



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍCH KOMUNIKACÍ

INSTITUTE OF ROAD STRUCTURES

ÚPRAVA ZEMIN V PODLOŽÍ VOZOVEK

IMPROVEMENT OF SOILS FOR PAVEMENT SUBGRADE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Radka Šefránková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DUŠAN STEHLÍK, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav pozemních komunikací

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Radka Šefránková
Název	Úprava zemin v podloží vozovek
Vedoucí práce	Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2016
Datum odevzdání	26. 5. 2017

V Brně dne 30. 11. 2016

doc. Dr. Ing. Michal Varaus
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

ČSN EN 14227-15

TP 94 Úprava zemin

prEN 16907 Earthworks

výzkumné zprávy a odborné příspěvky ze sborníků konferencí

odborné publikace a příspěvky z internetové sítě

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Zpracování aktuální rešerše o úpravách nevhodných zemin v podloží vozovky. Shrnutí zahraničních zkušeností s využitím tradičních a alternativních pojmů pro úpravu zemin pojivem. Porovnat možnosti úpravy pojivem a mechanické, doplněním hrubozrnné složky zeminy.

Prakticky ověřit možnosti úpravy mechanické a alternativním pojivem.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá úpravou nevhodných zemin v podloží vozovek. Teoretická část popisuje technologie úpravy a materiály používané pro zlepšení zemin u nás a v zahraničí. Hlavním cílem praktické části je sledovat únosnost neupravených a upravených zemin a výsledky porovnat.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with improvement of unsuitable soils for pavement subgrade. The theoretical part describes technologies of modification and materials employed for improving soils in our country and abroad. The main target of the practical part is observing bearing capacity of unimproved and improved soils and comparing the results.

KLÍČOVÁ SLOVA

Upravená zemina, únosnost, pojivo, cement, vápno, Proctorova zkouška, optimální vlhkost, okamžitý index únosnosti (IBI), kalifornský poměr únosnosti (CBR).

KEYWORDS

Improved soil, bearing capacity, binder, cement, lime, Proctor test, optimal water content, Immediate Bearing Index, California Bearing Ratio.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Radka Šefránková *Úprava zemin v podloží vozovek*. Brno, 2017. 68 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce Ing. Dušan Stehlík, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2017

Radka Šefránková
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala Ing. Dušanu Stehlíkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi pomohly při vypracování této bakalářské práce. Dále děkuji všem zaměstnancům laboratoře ústavu pozemních komunikací, a to především panu Pavlu Strakovi za pomoc při provádění laboratorních zkoušek. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině a přátelům, kteří mě podporovali během studia.

OBSAH

1	Úvod	10
2	CÍL PRÁCE.....	11
3	TEORETICKÁ ČÁST	12
3.1	ZÁKLADNÍ POJMY.....	12
3.2	TECHNOLOGICKÉ POSTUPY ÚPRAVY ZEMIN	13
3.2.1	Zemina upravená příměsí pojiva.....	13
3.2.2	Mechanicky upravená zemina	14
3.3	MATERIÁLY PRO ÚPRAVU NEVHODNÉ ZEMINY	15
3.3.1	Vápno – CaO	15
3.3.2	Cement.....	17
3.3.3	Popílek.....	18
3.3.4	Vysokopecní granulovaná struska	19
3.3.5	Hydraulická silniční pojiva.....	19
3.3.6	Směsné pojivo.....	20
3.3.7	Geosyntetika	21
3.4	VÝČET NEVHODNÝCH CHEMICKÝCH LÁTEK V ZEMINĚ	23
3.5	ZAHRANIČNÍ ZKUŠENOSTI	23
3.5.1	Geomříže v Turecku	24
3.5.2	Štěrka z pěnového skla	25
3.5.3	Infracrete	27
3.5.4	Popílek.....	28
3.5.5	Stabilizace zemin s vyšším obsahem sulfátů	32
4	PRAKTICKÁ ČÁST	34
4.1	POUŽITÝ MATERIÁL	34
4.2	STANOVENÍ ZRNITOSTI – SÍTOVÝ ROZBOR	34
4.2.1	Základní postup.....	34
4.2.2	Příprava na zkoušku	35
4.2.3	Promývání jemnozrnné zeminy	35
4.2.4	Prosévání vzorků	36
4.2.5	Výsledky zkoušek	37

4.3	ZHUTNITELNOST ZEMIN – PROCTOROVA ZKOUŠKA.....	43
4.3.1	Podstata zkoušky	43
4.3.2	Postup v laboratoři	43
4.3.3	Vyhodnocení zkoušky	46
4.4	CBR – KALIFORNSKÝ POMĚR ÚNOSNOSTI.....	47
4.4.1	Podstata zkoušky	48
4.4.2	Postup v laboratoři	48
4.4.3	Zkouška IBI	50
4.4.4	Zkouška CBR.....	50
4.4.5	Vyhodnocení zkoušky IBI a CBR	52
5	ZÁVĚR.....	60
6	SEZNAMY.....	62
6.1	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
6.2	SEZNAM TABULEK	66
6.3	SEZNAM OBRÁZKŮ	67
6.4	SEZNAM GRAFŮ.....	68

1 Úvod

Silniční doprava je nejvíce využívaný druh osobní dopravy. Z tohoto důvodu musí hustá silniční síť splňovat funkční požadavky, které se od ní očekávají a být v adekvátním stavu. Abychom mohli postavit kvalitní pozemní komunikaci je nutné stavět na pevných a stabilních základech. Je obecně známo, že málo únosné půdy způsobují nestabilitu konstrukce a řadu poruch. Chování zemin v podloží vozovky je proto nejdůležitější parametr, který musíme zvážit před samotným začátkem stavby.

Existuje několik způsobů, jak docílit požadované pevnosti podloží. Nevhodnou zeminu můžeme odstranit a nahradit ji vhodnějším materiálem. Tato varianta však bývá nákladná a má negativní vliv na životní prostředí.

Dnes se stále častěji využívá mechanická úprava, kdy se mísí dva nebo více druhů zemin, a tím se zlepšuje jejich zrnitost a vlhkost, nebo se zemina stabilizuje pomocí hydraulických pojiv (vápno, cement, struska, popílek a další). Stabilizace zvyšuje únosnost podloží, snižuje vlhkost, využívá místní materiál, redukuje celkovou tloušťku konstrukce, zvyšuje rychlost prací až o 30 %, snižuje znečištění okolí a přináší řadu dalších výhod. Druh a obsah pojiva volíme na základě typu zlepšované zeminy. Vlhkost nebo kvalita pojiva hrají také významnou roli. Jemnozrnné zeminy se nejčastěji používají v kombinaci s vápnem, hrubozrnné s cementem. Každý projekt je ale něčím speciální, proto se k němu musí přistupovat individuálně a požadované vlastnosti se musí vždy ověřit v laboratoři.

Řada výzkumných pracovišť po celém světě si klade za cíl najít ten nejlepší způsob úpravy nevhodné zeminy, a přitom dbát na životní prostředí.

Tato bakalářská práce se konkrétně zaměřuje na porovnání únosnosti zemin, které jsou buď neupravené, nebo mechanicky či chemicky upravené. Únosnost se zjišťuje na základě dvou empirických zkoušek: IBI (okamžitý index únosnosti) a CBR (kalifornský poměr únosnosti).

2 Cíl práce

Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. Cílem teoretické části je rozdělit a popsat základní technologie, které se používají pro stabilizaci zemin v současné době. Dále je nutné popsat chování základních pojiv a další možnosti, které se využívají ke zlepšení nevhodných zemin v podloží vozovky. Část práce shrnuje poznatky a zkušenosti s úpravou zemin v zahraničí.

V praktické části je provedeno srovnání výsledků laboratorních zkoušek na třech odlišných typech zemin za účelem zjištění vhodnosti mechanické úpravy nebo úpravy pojivem. Cílem je zeminy pojmenovat, zjistit jejich optimální vlhkost zkouškou Proctor modifikovaný, a nakonec vzorky vystavit zatěžovací zkoušce IBI a po uplynulé době zrání také zkoušce CBR. Porovnat výsledky CBR pro mechanicky upravenou zeminu a CBR pro zeminu upravenou pojivem. Do dvou vzorků jsou záměrně přimíchána pojiva – cement a vápno, každé samostatně. Hlavním cílem je porovnat únosnost zlepšených a nezlepšených zemin a výsledky na základě grafů a tabulek vyhodnotit.

3 Teoretická část

3.1 Základní pojmy

Zemina – přírodní, umělý nebo recyklovaný materiál nebo jakákoliv kombinace těchto materiálů.

Zemina upravená cementem – směs vzniklá přidáním cementu, a kde je to vhodné, dalších vstupních materiálů do zeminy.

Zemina upravená vápnem – směs vzniklá přidáním vápna do zeminy tak, aby mohla splnit dané požadavky.

Úprava zeminy – technologie úpravy zeminy za účelem zlepšení zpracovatelnosti a/nebo zlepšení geomechanických vlastností.

Zemina upravená mechanicky – zemina upravená mísením s jinou, granulometricky odlišnou zeminou.

Zemina upravená příměsí pojiva – zemina upravená promísením s pojivem nebo směsí pojiv. [1]

Zkouška Proctor modifikovaný – zkušební metoda pro stanovení vzájemného vztahu mezi vlhkostí a srovnávací objemovou hmotností. [2]

Kalifornský poměr únosnosti (*California Bearing Ratio, CBR*) – index užívaný pro stanovení charakteristik únosnosti směsi, stanovený ihned po zhutnění nebo po době zrání.

Okamžitý index únosnosti (*Immediate Bearing Index, IBI*) – okamžitá hodnota Kalifornského poměru únosnosti stanovená bez použití zatěžovacího prstence. [3]

3.2 Technologické postupy úpravy zemin

3.2.1 Zemina upravená příměsí pojiva

Zlepšení vlastností zemin přidáním hydraulického pojiva se provádí dvěma způsoby, a to v míchacím centru nebo častěji na místě. Spolu s pojivem se do zeminy přidává voda a výsledkem této úpravy je proměna homogenního materiálu na materiál s novými vlastnostmi, který odolává většímu zatížení.

- **Technologie in situ**

Výhodou úpravy na místě je zpracování místních materiálů a jejich maximálního využití. Nevhodná zemina již nemusí být odtěžena, odvezena na skládku a nahrazena vhodnější zeminou. Technologie úpravy zeminy in situ výrazně zefektivňuje prováděné zemní práce, snižuje náklady a zkracuje dobu výstavby. Určení druhu pojiva, tloušťky vrstev a návrh směsi musí být vždy proveden na základě průkazných zkoušek při geotechnickém průzkumu, individuálně pro danou lokalitu. [4]

Nejprve se musí připravit pracovní úsek – zemina se rozryje do požadované hloubky, odstraní se nevhodný materiál, který by mohl narušovat stabilizaci a poté se srovná. V závislosti na zjištěné vlhkosti se pomocí dávkovačů rovnoměrně rozprostře po celém povrchu pojivo, a to s přesností $\pm 10\%$. Před nebo po dávkování pojiva se hlavně v letních měsících přidává voda, aby byla zajištěna optimální vlhkost potřebná pro hutnění. Zemní frézou se zemina promísí s pojivem. Hloubka mísení je omezena na maximálně 0,50 m s pracovní šířkou záběru do 2,5 m. Upravené zeminy se zhutní hutnícími válci. Pro finální úpravu vrstvy jsou vhodné pneumatikové válce.

Pokud použijeme cement, je důležité po jeho dávkování začít bezodkladně s hutněním. Hydratace nastává ihned po kontaktu cementu s vodou a zemina tvrdne.

[1] [6]

- **Technologie v míchacím centru**

Zemina se s pojivem mísí v míchacím centru a na stavbu se doveze již výsledná směs, která se rozprostře a zhutní. Tento postup se používá v případě, kdy se nepoužívá místní, ale dovezená zemina.

3.2.2 Mechanicky upravená zemina

Jedná se o takové zlepšení zeminy, kdy je zemina mísená s jinou granulometricky odlišnou zeminou vhodné zrnitosti a vlhkosti. Cílem je zpravidla úprava křivky zrnitosti a dosažení dostatečné únosnosti dle návrhových parametrů projektové dokumentace. Volba úpravy závisí vždy na jejich fyzikálně – mechanických vlastnostech a chemickém složení zeminy. Mechanickou úpravou se dosáhne lepších mechanických vlastností upravené zeminy, lepší zpracovatelnosti, vyšší smykové pevnosti a nižší stlačitelnosti. Většinou se přimíchává hrubozrnná zemina k jemnozrnné, může ale nastat i opačný případ. Velikost zrn přidávané zeminy je individuální a závisí na vlastnostech zlepšované zeminy. [4]

Zvláštním případem mechanické úpravy je **úprava zemin geosyntetickým materiálem**, obvykle za účelem zvýšení smykové pevnosti. Použití vláken je dosud ve stadiu ověřování jejich praktického využití a laboratorní zkoušky se provádějí v mnoha zkušebních laboratořích po celém světě.

Technologie úpravy se provádí na místě, kdy se většinou do jedné vrstvy zeminy – např. stejnozrnný písek, frézou vmísí druhá zemina – např. štěrk. Směs musí být zhutněna na požadovanou míru zhutnění v celé tloušťce zhutňované vrstvy. Tloušťka vrstvy a její vlhkost se doporučuje určit zhutňovací zkouškou. Vlhkost rozprostřené zeminy se před zahájením zhutňovacích prací nesmí lišit o více než +3 % oproti optimální vlhkosti stanovené zkouškou Proctor Standard. Ihned po zhutnění se provede zkouška CBR.

Mechanickou úpravu lze doporučit pro hrubozrnné zeminy s kyselým pH, případně s vysokým obsahem sulfátů. [1] [7]

3.3 Materiály pro úpravu nevhodné zeminy

Pojiva:

3.3.1 Vápno – CaO

Běžně lze aplikovat vzdušná vápna (viz obr. 1) ve formě nehašeného vápna, hašeného vápna nebo jako vápenné mléko.

Vápno se přidává v množství obvykle 1–3 % ke zlepšení vlastností převážně jílovitých zemin s indexem plasticity $I_p=10$ % a vyšším.

Reakcí vápna s jílovitými minerály dochází ke kationtové výměně, která mění strukturu výsledného materiálu z vrstevnaté na zrnitou. Vápenné ionty mohou za flokulaci, tedy shlukování částic, čímž se snižuje obsah zrn $<0,063$ mm a materiál se stává zrnitý.

Z dlouhodobého hlediska dochází k postupné krystalizaci gelu, až vznikne pevný stmelený materiál, který je pevnější než původní plastický jíl.



Obrázek 1: Vzdušné vápno [22]

Okamžitý efekt vápna (viz obr. 2):

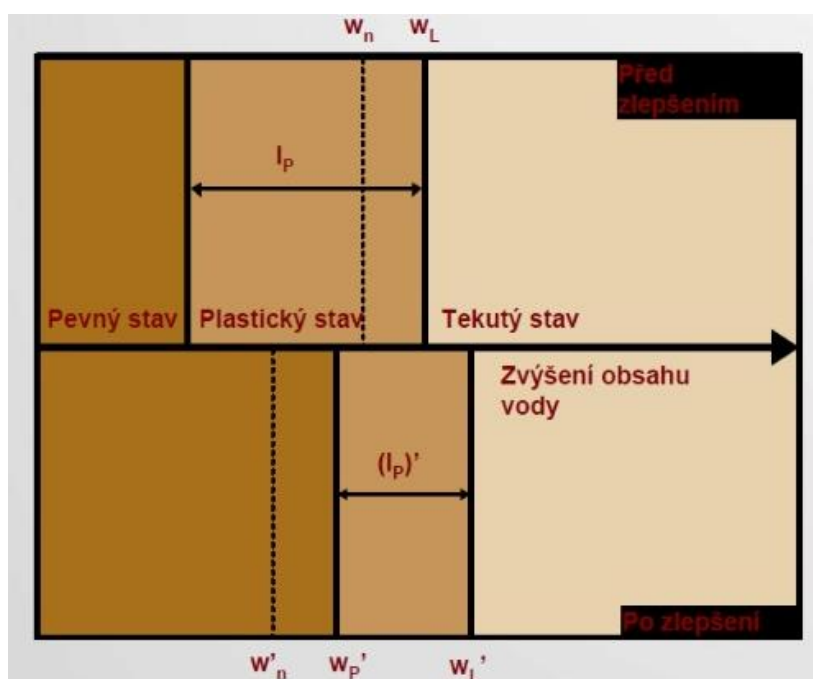
- Okamžité snížení vlhkosti

Nastává kombinací několika faktorů:

- hydratací vápna
- vypařováním vody působením tepla
- přidáním suchého vápna, čímž se sníží poměr hmotnosti vody/ hmotnosti pevné části

Tyto vlivy mohou příměsí 1 % vápna způsobit snížení vlhkosti o 1–2 %, maximálně až o 5 %.

- Zvýšení meze plasticity
 - zvyšuje se obvykle mez plasticity a tím se snižuje index plasticity
 - zemina je pevnější a lépe zpracovatelná, dokáže pojmout větší množství vody
- Nižší citlivost na vlhkost
 - w_{op} = optimální vlhkost se zvyšuje, maximální objemová hmotnost klesá, Proctorova křivka má plošší tvar
- Zvýšení pevnosti, CBR a IBI
 - velmi výrazně roste hodnota poměru CBR v čase
- Snížení součinitele namrzavosti



Obrázek 2: Okamžitý efekt vápna [8]

Obrázek 2 – Okamžitý účinek vápna na plasticitu zeminy a její zpracovatelnost:

Vysoušení: obsah vody je změněn z w_n na w'_n

Plasticita: zlepšení vápnem zvětšuje pevný stav zeminy, to umožňuje zemině přijmout

větší množství vody, index plasticity $I_p = w_L - w_p$ se mění [8]

Dlouhodobý efekt vápna:

- Pucolánová reakce
 - jíla a vápno reagují pomalu, výsledkem je pucolánová reakce, při které dochází k postupné krystalizaci gelu, až vznikne pevný stmelený materiál, který je pevnější než původní zemina.

Rychlost pucolánové reakce je závislá na teplotě:

- při teplotě $<5^{\circ}\text{C}$ se reakce zastavuje
- hodnoty pevností při teplotě 20°C po jednom roce lze dosáhnout při teplotě 40°C již po 30 dnech
- Postupný nárůst poměru únosnosti CBR
 - zvýšení po 30 letech až na hodnotu $\text{CBR}=200\text{--}300\%$
- Syntaktický efekt
 - u saturovaných nebo téměř saturovaných vápenců a slínovců [1]

3.3.2 Cement

Cement (viz obr. 3) je hydraulické pojivo, které tuhne po zamísení se zeminou i pod vodou. Používá se pro zlepšení zemin s příměsí písčitých částic s $I_p < 6\%$. Množství přidaného cementu je vyjádřeno v procentech suché hmotnosti zeminy a pohybuje se v rozmezí obvykle $2\text{--}4\%$, jemnozrnnější zemina požaduje větší množství cementu. Před stabilizací je důležité provést laboratorní zkoušky, kterými se stanoví množství cementu a vody potřebné pro požadovanou pevnost a odolnost zeminy.



Obrázek 3: Cement [9]

I při malém podílu cementu dochází ke:

- Snížení plasticity vysoušením zeminy
 - 1 % hydraulického pojiva sníží vlhkost o 0,3–0,5 %
- Snížení množství jílovitých částic
 - stejně jako u vápna probíhá flokulace jílovitých minerálů
- Zvýšení poměru únosnosti CBR a smykové pevnosti
- Snížení objemových změn [1]

Tabulka 1: Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1 % příměsi pojiva [1]

Vlastnost zeminy	Působení	Příměs páleného vápna	Příměs cementu
Vlhkost	snižuje	1–2 %	0,2–0,4 %
Maximální objemová hmotnost	snižuje	5–100 kg/m ³	6–20 kg/m ³
Optimální vlhkost	zvýšuje	0,5–2 %	Beze změny
Poměr únosnosti CBR na vzorku zhutněném při zkušební vlhkosti	zvýšuje	5–50 % CBR	5–15 % CBR
Na vzorku po zrání a následné saturaci	zvýšuje	5–50 % CBR	10–50 % CBR

3.3.3 Popílek

Je nerostný zbytek, který vzniká při spalování uhlí v tepelných elektrárnách. Pozůstává převážně z malých částíček křemičitanového skla a zachycuje se v elektrostatických odlučovačích z plynných spalin. Má hydraulické i pucolánové vlastnosti a používá se především pro zlepšení vlastností písčitojílovitých zemin.

Každoročně se vyprodukuje milióny tun popílku, které je potřeba zlikvidovat. Popílek však rozhodně nemusí být jen obtížným odpadem. V posledních letech se stává cennou surovinou, která se využívá ve stavebnictví po celém světě. Přidává se při výrobě betonů a malt, díky čemuž se redukuje množství pojiv (cementu a vápna), a dále pak pro stabilizaci základových půd.

Při kombinaci popílku s cementem se nejprve dávkuje popílek, ten se promísí samostatně, a pak se dávkuje cement, který se také promísí a směs se zhutní.

Efekt popílku:

- Zvyšuje pevnost směsi
 - s rostoucím časem roste pevnost v prostém tlaku směsi
 - růst pevnosti závisí na plasticitě zeminy
- Nárůst hodnoty CBR
 - růst hodnoty poměru únosnosti je pomalejší než v případě vápna nebo cementu (nižší podíl volných kationtů) [1]

3.3.4 Vysokopecní granulovaná struska

Latentně hydraulická látka, která odpadá jako vedlejší produkt při výrobě surového železa ve vysoké peci. Je-li tavenina strusky rychle zchlazena vodou, zabrání se její krystalizaci a struska zůstává ve skelném stavu s latentně hydraulickými vlastnostmi. Rychlým zchlazením taveniny vodou vzniká produkt s obsahem 30 % vody, který během skladování a dopravy klesá.

Chemické složení vysokopevnostních strusek je proměnné. Dalším negativním faktorem je jejich rekrystalizace, to má za následek zhoršování fyzikálně-mechanických vlastností produktů z nich vyrobených. Z těchto důvodů se struska k úpravě zemin v České republice nepoužívá. Hlavní úlohu plní v cementárenském průmyslu. [1]

3.3.5 Hydraulická silniční pojiva

Technologie úpravy zemin má v České republice již dlouholetou tradici. Tradiční pojiva jsou ale postupně nahrazována novými. Díky novým materiálům dochází k velkým úsporám nejen finančních prostředků, ale i času.

Důvodů pro hledání nových typů pojiv je hned několik. Vápno nelze použít pro všechny druhy zemin a jeho cena rok od roku roste. Navíc v písčitých zeminách je nutné použít buď jen cement, nebo kombinaci vápna s cementem, což je technologicky i finančně náročné. Neexistuje ani vhodný druh cementu, který by při rychlém nárůstu pevnosti neměl tendenci k tvorbě trhlin.

Po několika praktických zkouškách vstoupil na trh v roce 2003 nový výrobek typu Doroport TB₂₅ firmy Holcim.

Doroport TB₂₅ se vyrábí kombinovaným mletím slínku a hydraulických komponentů. Přináší výhodu v prodloužené době zpracování na místě, redukuje vznik reflexních trhlin, nabízí dlouhodobý nárůst pevnosti v tlaku a je vysoce odolný proti síranům. Přestává se řešit dvojí dávkování a dvojí míchání.

V roce 2014 přišel Holcim s dalším výrobkem- Dorosolem C xx (xx znamená podíl vápna ve směsi). Materiál **Dorosol C** je směsí vápna, cementu a dalších cementárenských surovin. Výhodou je, že není nutné dvojí dávkování a poměr vápna a cementu je výrobce schopen v širokém rozmezí měnit, proto je tento typ pojiva flexibilním řešením pro širokou škálu různých typů zemin. Dorosol C zlepšuje zejména zpracovatelnost, zvyšuje únosnost a odolnost proti povětrnostním vlivům, snižuje vlhkost a šetří životní prostředí. [10] [11]

3.3.6 Směsné pojivo

V roce 1994 bylo v Německu poprvé použito směsné pojivo, které vzniklo kombinací vápna a cementu. Cílem směsného pojiva je zkombinovat v jednom pracovním procesu vlastnosti obou pojiv. Díky vápnu má dojít ke snížení vlhkosti u velmi vlhkých soudržných zemin a zemin se širokou zrnitostí. Cement zase zvýší požadovanou pevnost v tlaku. Podle vlastnosti pojiva činí doba reakce u vápna 24 hodin a u cementu 1 hodinu.

Směsná pojiva mohou být použita pro zlepšení zemin se širokou zrnitostí a lehce až středně plastických zemin.

Ačkoliv je v Německu směsné pojivo nabízeno několika výrobci, reaktivní chování tohoto směsného pojiva ještě není dostatečně ověřeno. [1] [12]

3.3.7 Geosyntetika

Dalším způsobem úpravy nevhodných zemin může být mechanická úprava pomocí geosyntetik. Každý typ geosyntetického výrobku má své specifické vlastnosti. Správný výběr geosyntetického prvku je zvolen na základě odborného posouzení. Jedná se o plošný polymerní materiál, vyráběný specifickou technologií z polyethylénu nebo polypropylenu.

Zeminy vykazují malou pevnost v tahu, a tak i poměrně nízkou schopnost přenášet tahová napětí, které vznikají při jejím zatěžování. Takto vzniklé síly mohou být zachyceny právě pomocí geosyntetik nebo výztužných geomříží.

Aby výztuha plnila svou funkci, musí vykazovat nízké protažení při namáhání a vysokou pevnost. Výběr a návrh výztuhy se volí s ohledem na druhu použité zeminy v konstrukci.

- **Geomříže**

- jsou vhodné pro zrnité, nesoudržné materiály na štěrkové bázi
- mají rovinnou otevřenou strukturu tvořenou systémem vzájemně na sebe kolmých podélných a příčných žebor
- otvory jsou obvykle o velikosti 10–100 mm a umožňují tak částicím zeminy proniknout skrz otvor
- dělí se na jednoosé a dvouosé, u jednoosé geomříže převládá pevnost v jednom směru

- výrobky jsou vysoce odolné vůči vodním roztokům kyselin, zásad a solí, nejsou náchylné k poškození v důsledku mechanického namáhání, odolávají UV záření
- jejich konstrukční vlastnosti přetrvávají desetiletí, proto se mohou aplikovat i do konstrukcí s návrhovou životností delší než 100 let [13] [14]
- Principem výztuhy je zaklínění zrn zeminy do struktury geomříží. Absorpcí tahových sil ve výztuze se vnější zatížení rozloží na velkou plochu. Minimalizuje se lokální namáhání podloží a omezí se tvoření nepravidelných deformací, které vznikají v zemním tělese při vysokém stlačení. Zároveň se zabrání vzniku trhlin a zmenší se rozdíly v sedání.

Použití geosyntetik přináší tyto výhody:

- zvýšení únosnosti
- úspora tloušťky zrnité vrstvy až o 40 % bez snížení únosnosti
- snížení množství vytěžené zeminy s úsporou přírodních zdrojů
- redukce nebezpečí vytvoření lokálních poruch a oslabení v podloží
- dosažení lepšího zhutnění na měkkém podloží
- prodloužení životnosti konstrukce
- omezení nerovnoměrného sedání
- vysoká hospodárnost projektu
- jednoduchá manipulace
- možnost výstavby i v zimním období

Výztužná funkce, ve vztahu k únosnosti podloží, není v současné době stále podrobně prozkoumána, tímto problémem se zabývá řada českých i zahraničních pracovišť. Konají se také různé konference, aby se laboratoře podělily o své dosud nabyté vědomosti a zkušenosti. [13]

3.4 Výčet nevhodných chemických látek v zemině

Je důležité znát obsah chemických látek, které se v zemině vyskytují. Tyto látky totiž mohou reagovat s přidanými pojivy a negativně ovlivňovat jejich vlastnosti.

- Organické látky
 - zvyšují spotřebu pojiv, část přidaného pojiva se používá k neutralizaci
- Chloridy
 - urychlují zpevňování zemin, zároveň způsobují bobtnání při vytvoření chloro-aluminátů
- Fosfáty a dusičnany
 - zpomalují hydraulickou reakci
- Sulfáty a sulfidy
 - urychlují tuhnutí
 - při větším obsahu síranů a siřičitanů může vzniknout ettringit, který zpomaluje až zastavuje tuhnutí cementu a způsobuje objemové změny
 - obsah sulfátů v zemině by měl být max. 1,5 % [1]

3.5 Zahraniční zkušenosti

V dnešní době se neustále vyvíjí metody zlepšující vlastnosti nevhodných zemin. Laboratoře po celém světě zkoušejí různé metody a jejich účinnost porovnávají. Jejich cílem je najít takový způsob úpravy, který zvyšuje stabilitu zeminy, je ekonomicky výhodný a šetrný k životnímu prostředí. Najít vhodnou úpravu není vůbec jednoduchý úkol, zato velice důležitý. Podloží ovlivňuje životnost celé konstrukce vozovky, přenáší účinky zatížení, a proto musí vykazovat dostatečnou únosnost a minimální deformace.

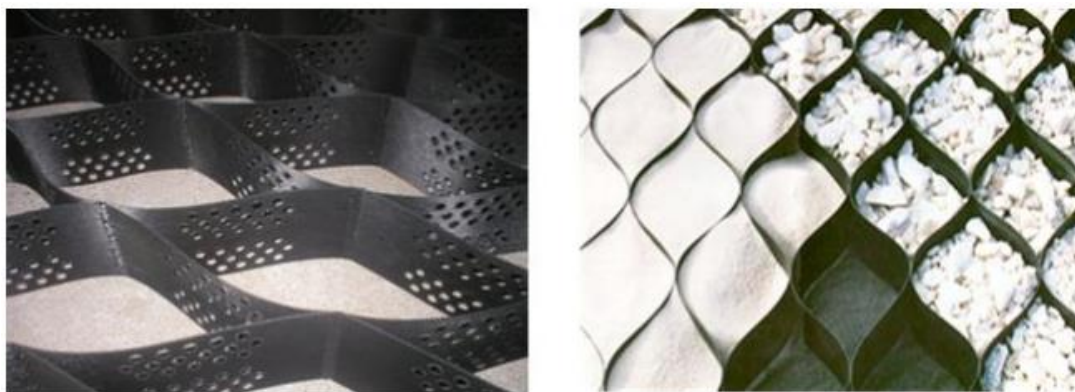
Ke každé stavbě musíme přistupovat individuálně a vždy musí být proveden pečlivý geotechnický průzkum. Samotná volba úpravy je závislá především na typu zeminy, množství vlhkosti a podmínkách okolního prostředí. Nejčastěji používaná pojiva s dlouholetou tradicí jsou cement a vápno. Dále se aplikují popílký, směsná pojiva nebo výztužné geotextilie a další. Následující stránky popisují tradiční i moderní technologie, které se používají v zahraničí.

3.5.1 Geomříže v Turecku

V Turecku se prováděl výzkum, ve kterém se porovnávalo použití geosyntetik (geotextilie a geomříže) a různého množství vápna v jílovité půdě s vlhkostí o 10 % vyšší než optimální vlhkost. Bylo zjištěno, že vápno nebo výztužná geotextilie použité samostatně nesplňují požadavky na únosnost. Nejlepší výsledky jsou dosaženy, pokud se tyto dvě složky zkombinují. Pro splnění podmínky CBR bylo potřeba 12 % vápna – pro snížení vlhkosti a geomříž nebo geotextilie – pro zvýšení únosnosti. Nižší množství vápna bylo nedostačující.

Poprvé byla **geomříž** použita již v roce 1975 v USA. Nedostatek podrobných výzkumů a návrhových metod ale vedl k tomu, že se tato technologie používala pouze v omezeném měřítku. Dnes je vyztužování zemin geomříží považováno za jednu z moderních technologií a zkoušky zkoumající její vlastnosti se provádějí v laboratořích po celém světě. Tato metoda má značný potenciál při řešení speciálních geotechnických problémů v podloží pozemních komunikací.

Výhodou je její 3D rozměr, který je efektivnější než chování plošných geotextilií. Tyto 3D buňky, svým vzhledem připomínající včelí plástev, jsou zcela vyplněny zeminou. Při působení zatížení má zemina tendenci uhýbat do stran, tomu však brání stěny geomříže. (viz obr. 4)



Obrázek 4: Geomříž při pohledu z blízka [15]

Tento vyztužovací systém zvyšuje únosnost a snižuje sedání. Další výhodou jsou poměrně nízké pořizovací náklady, jednoduchá konstrukce, úspora času a šetrnost k životnímu prostředí.

Geomříž se často pokládá na geotextilii, která slouží jako separační vrstva.

[16] (viz obr. 5)



Obrázek 5: Pokládka geomříže na separační geotextilii [17]

3.5.2 Štěrk z pěnového skla

Jedná se o produkt 100 % vyrobený z recyklovaného odpadního skla (viz obr.6), proto je hospodárny a šetrný k životnímu prostředí.

Jeho největší výhodou je jeho propustnost bez ztráty únosnosti.

Další vlastnosti:

- pórovitý materiál – uzavřená struktura vytváří izolační vrstvu
- jednotlivé částice zajišťují dostatečnou stabilitu v cyklu zmrazování a rozmrazování
- vodotěsný
- dobré tepelně izolační vlastnosti

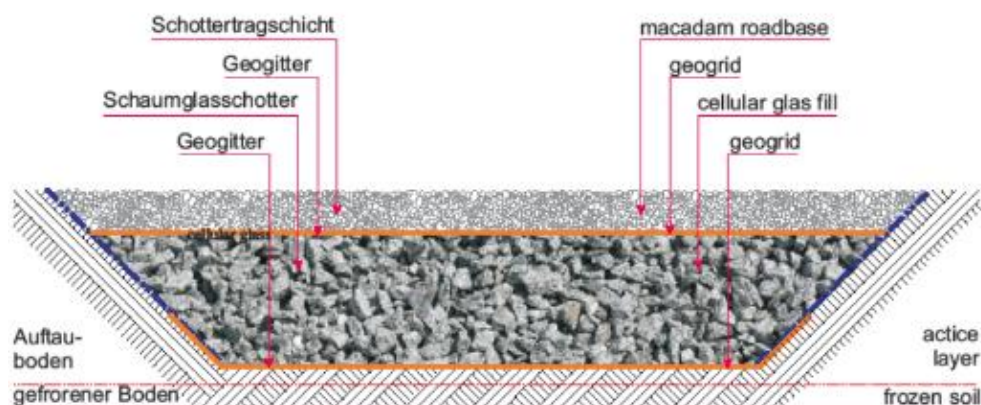
- odolný vůči chemickým vlivům
- nehořlavý
- teplota tání je vyšší než 700 °C
- velice lehký



Obrázek 6: Štěrk z pěnového skla [18]

Štěrk z pěnového skla se pokládá na netkanou geotextilii, která zamezuje promíchání štěrku s málo únosným podložím.

Díky vysoké teplotní vodivosti je tento materiál vhodný především pro stabilizaci zemin v oblastech permafrostu (viz obr. 7). Permafrost se nachází zejména v Rusku a Číně a jedná se o půdu, která je po většinu roku zmrzlá. V letních měsících horní vrstva permafrostu taje a mění svoje vlastnosti, čímž výrazně klesá jeho únosnost. Užívání pozemních komunikací je v tomto období zakázáno, což vede k velkým ekonomickým ztrátám. Proto je potřeba najít způsob, jak zlepšit vlastnosti zeminy i v letním období.

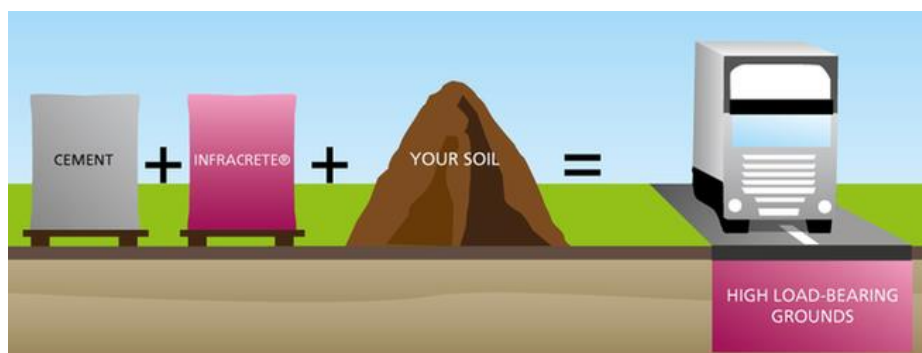


Obrázek 7: Umístění štěrku z pěnového skla v permafrostu [19]

Aplikace štěrku z pěnového skla přináší díky svým vlastnostem výhody. Na jedné straně snižuje důsledkem roznášecího efektu svislé zatížení, a tím i deformace. Na straně druhé snižuje tání izolované vrstvy permafrostu díky svým tepelným vlastnostem. [20]

3.5.3 Infracrete

Infracrete je nerostný produkt, který byl vyvinut v Německu.



Obrázek 8: Technologie použití infracretu [21]

Je to hydraulické pojivo, které se spolu s cementem přidává do nestabilní zeminy (viz obr. 8). Vždy se aplikuje 98 % cementu a 2 % infracretu. Hlavní výhodou je, že při stabilizaci nevzniká žádný odpadní materiál.

Může se používat do všech typů zemin kromě rašelin. Infractere neutralizuje fulvické a karboxylové kyseliny a tím zvyšuje proces hydratace cementu.

Výsledkem stabilizace je vrstva, která je:

- nepropustná
- mrazuvzdorná
- vysoce únosná
- odolná proti působení kyselin a solí [21]

3.5.4 Popílek

Popílek (viz obr. 9) je jemný nerostný zbytek, který vzniká při spalování uhlí v tepelných elektrárnách.

V USA se ročně vyprodukuje více než 130 miliónů tun tohoto odpadního materiálu. Z toho přibližně 40 % nachází své uplatnění ve stavebnictví, zbytek končí na skládkách. Popílek se přidává do betonu, ale také se používá ke stabilizaci zemin.

Jedná se o materiál s pucolánovými vlastnostmi, který v přítomnosti s vodou reaguje s hydroxidem vápenatým a vytváří sloučeniny, které s postupem času tvrdnou a nabývají na pevnosti. Jemnost popílku je jedna z nejdůležitějších vlastností, která se podílí na pucolánové reakci.



Obrázek 9: Popílek [23]

Podle AASHTO (Americké asociace státních silnic a dopravy) se popílký dělí na dva základní typy: popílký třídy C a třídy F.

- Popílký třídy C obsahují obvykle více než 20 % CaO, jsou to tzv. samostatné materiály, reakce probíhá bez použití aktivátoru.
- Popílký třídy F obsahují méně než 10 % CaO, musí se k nim přidat aktivátor (cement, vápno nebo prach z vápence), který spustí pucolánovou reakci.

Popílký přidávané do zeminy zlepšují její vlastnosti:

- zvyšují pevnost
- regulují smršťování a bobtnání rozpínavých zemin
- snižují vlhkost zeminy, čímž umožňují lepší zhutnitelnost

Pevnost v tlaku závisí na:

- vlastnostech zeminy
- době zpoždění – doba měřená mezi prvním kontaktem popílků s vodou a konečným zhutněním zeminy, popílků a vody
- množství vlhkosti v době zhutňování
- množství a kvalitě popílků

Pevnost v tlaku vysoce závisí na **době zpoždění**. Zhutnění musí proběhnout ihned po promíslení zeminy s vodou a popílkem. Toleruje se zpoždění 1 hodina, protože čím později je směs zhutněna, tím menší je konečná pevnost.

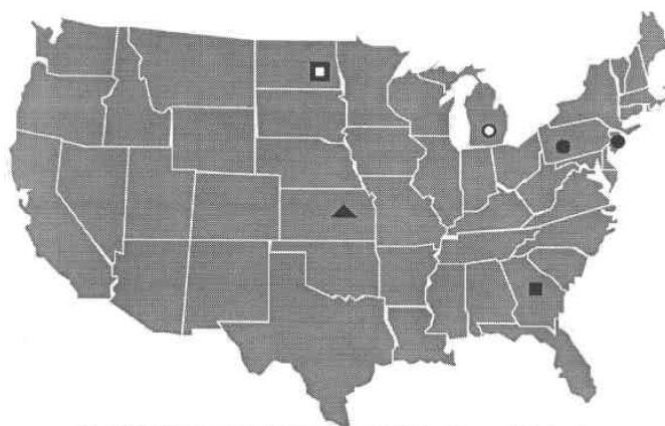
Obsah vody by neměl překročit optimální vlhkost. U jílovitých zemin by měla být vlhkost o 4–8 % nižší. U hrubozrnných zemin se doporučuje vlhkost o 1–3 % nižší.

Nejčastěji se přidává 8–16 % popílků vycházející z hmotnosti suché zeminy. Konkrétní **množství** ale závisí na povaze zeminy, charakteristikách popílků a požadované pevnosti. Množství popílků se určuje podle výsledků laboratorních zkoušek. V USA se řídí podle požadavků AASHTO.

Popílký našly své uplatnění v mnoha státech světa, nicméně stále platí, že velké množství tohoto materiálu končí jako odpadní materiál na skládkách. Problém pravděpodobně spočívá v různé kvalitě a nehomogenitě popílků, což závisí na vstupních materiálech, způsobu spalování apod. Potenciální spotřebitelé jsou často nedostatečně informováni o ekonomických i technických výhodách, které plynou z používání popílků. Proto bylo za účelem zvýšení spotřeby provedeno několik rozsáhlých studií a výzkumů. [24] [25]

- USA

- laboratorní zkoušky trvaly 15 let
 - testovaly se popílký z 20 různých elektráren
 - proběhly zkoušky vyluhování, kdy se hodnotila kvalita podzemní vody
 - na základě testů se zjistilo, že žádný zkoušený popílek negativně neovlivňuje životní prostředí
 - kvalita podzemní vody nebyla zasažena
 - ke stejnému výsledku došly i laboratoře z Finska [25]
-
- v roce 1984 byl zahájen program sponzorovaný výzkumnou institucí (EPRI)
 - cílem bylo připravit zprávu shrnující zkušenosti s popílký získané v minulých letech a vydat manuál týkající se návrhu a provedení technologických vrstev z popílků
 - EPRI také sponzorovala 6 ukázkových projektů (viz obr. 10)
 - hlavním záměrem projektů bylo zdokumentování návrhu, konstrukce a pozdější chování popílků, použitých jako výplň násypů a v podloží vozovek
 - EPRI očekávala, že si díky těmto projektům potencionální zákazníci a úřady uvědomí, že popílký jsou vhodný stavební materiál, že jimi lze nahradit některé přírodní produkty a šetřit tak neobnovitelné přírodní zdroje
 - ukázkové projekty probíhaly 5 let na celém území USA
 - vše bylo pečlivě zaznamenáno a bylo vydáno několik důležitých manuálů
 - díky tomu se výhody popílků dostaly do podvědomí veřejnosti [26]



Obrázek 10: Mapa USA s vyznačenými místy ukázkových projektů [26]

- Botswana
 - země je ze $\frac{3}{4}$ pokrytá pouští Kalahari
 - velkým problémem je nedostatek kvalitního stavebního materiálu a nepříznivé geologické a klimatické podmínky
 - kvůli malé únosnosti svrchního půdního pokryvu jsou zde nekvalitní cesty
 - cílem výzkumu bylo zvýšit hodnoty CBR různých typů zemin, které se v této oblasti nacházejí
 - zeminy byly smíchány s různým množstvím popílku
 - bylo zjištěno, že CBR roste s množstvím přidávaného popílku a s rostoucí dobou tvrdnutí
 - největší únosnost dosáhly písčité zeminy, nejmenší jílovité zeminy
 - pro zlepšení písků z Kalahari bylo potřeba až 24 % popílku, při nižším množství neprobíhala pucolánová reakce
 - výsledky ukázaly, že popílky jsou vhodné ke stabilizaci zemin a jsou ekonomicky výhodné
 - cílem bylo zvýšit používání popílku, které z 95 % končily na skládce [27]

Vlastnostmi popílku se také zabývala pracoviště ve Finsku nebo v Japonsku.

3.5.5 Stabilizace zemin s vyšším obsahem sulfátů

Stát Texas v USA zaznamenal několik poruch zdvihem (viz obr. 11) u zemin s vysokým obsahem sulfátů stabilizovaných tzv. pojivy na bázi vápníku (vápno, cement nebo popílek třídy C). Problémem je chemická reakce, která probíhá, pokud jsou ve stabilizované zemině tyto čtyři složky: vápník, hliník, voda a sulfáty. Výsledkem reakce je vznik minerálů (nejznámější je ettringit), které dokáží pojmout obrovské množství vody a nabobtnat až na dvojnásobek svého objemu.

Abychom zabránili poruchám, musí tyto škodlivé minerály vzniknou už během doby zrání, ještě před hutněním zeminy. Díky tomu žádné škody nenastanou. Doba zrání je závislá na rozpustnosti sulfátů. Může se pohybovat od 24 hodin do 7 dnů. Nejdůležitější složkou k rozpuštění sulfátů je dostatečné množství vody. Obvykle se přidává 3–5 % nad optimální vlhkost.



Obrázek 11: Ukázka zdvihu zeminy s vysokým obsahem sulfátů po stabilizaci vápnem [29]

Pokud je koncentrace sulfátů:

- < **než 0,3 %** hmotnosti zeminy – stabilizace vápnem probíhá tradičně, nevznikají škodlivé minerály
- **0,3–0,8 %** hmotnosti zeminy – zvláštní pozornost musí být věnována dostatečnému množství vody během doby míchání, zrání a tuhnutí. Laboratorními testy se zjišťuje doba potřebná pro rozpuštění sulfátů.
- > **než 0,8 %** hmotnosti zeminy – stabilizace vápnem je riziková, je potřeba provést laboratorní testy a mít s úpravou těchto zemin s vysokým obsahem sulfátů zkušenosti. Místo vápna se používá vápenná kaše a doba zrání bývá až 7 dní, během kterých se doporučuje kontrolovat hustota směsi. Efektivní může být také tzv. dvojité zamíchání vápna.

Polovina vápna se vmíchá do zeminy spolu s vodou a směs se nechá zrát 72 hodin až 7 dní, během nich se mají vytvořit minerály. Potom se přidá druhá polovina vápna a směs se zhutní. Tato metoda v některých situacích snižuje mrazový zdvih a zlepšuje dlouhodobou stabilizaci, je ale nákladnější, proto se musí nejdříve ověřit v laboratoři.

Před samotnou stabilizací zeminy je vždy důležité zjistit na několika místech, jaká je přesná koncentrace sulfátů a v jaké hloubce se nacházejí. Např. v Texasu jsou v hloubce 1–2 metry. V USA se také používá velice spolehlivá pomůcka, tzv. "zpráva o zemědělské půdě", která obsahuje velké množství informací o půdním profilu všech států USA. [28] [29]

4 Praktická část

Obsahem kapitoly je popis a vyhodnocení zkoušek, které byly provedeny v laboratoři ústavu pozemních komunikací FAST v Brně na třech vzorcích zeminy za účelem stanovení vhodnosti mechanické úpravy zeminy nebo úpravy pojivem. Výsledky jsou přehledně zaznamenány v tabulkách, grafech a doplněny fotografiemi z měření. Zkoušky probíhaly podle platných norem a předpisů.

4.1 Použitý materiál

Pro zkoušení v laboratoři byly použity tyto tři vzorky: hrubozrnná zemina (viz obr. 12), jemnozrnná zemina (viz obr. 13) a směs těchto dvou zemin v poměru 1:1.



Obrázek 12: Hrubozrnná zemina



Obrázek 13: Jemnozrnná zemina

4.2 Stanovení zrnitosti – Sítový rozbor

4.2.1 Základní postup

Zkouška probíhá na základě normy ČSN CEN ISO/TS 17892-4: Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 4: Stanovení zrnitosti zemin. Podstatou zkoušky je prosévání (promývání) vzorku sadou normových sít, které se odlišují velikostí otvorů, uspořádaných od největších po ty nejmenší. Zemina je roztříděna na jednotlivé frakce. Tyto částice zachycené na sítích se zváží a vypočítá se jejich procentuální podíl k počáteční hmotnosti vzorku. Výsledky jsou graficky zaznamenány křivkou zrnitosti, ta umožňuje zeminu klasifikovat. [30]

4.2.2 Příprava na zkoušku

Před samotným síťovým rozbořem bylo potřeba připravit 3 vzorky, každý o hmotnosti 500 g. Po vysušení v sušárně na ustálenou hmotnost mohlo být ihned provedeno síťování hrubozrnné zeminy a směsi (250 g hrubozrnné zeminy a 250 g jemnozrnné zeminy). Vzorek jemnozrnné zeminy musel být nejprve promýván, opět vysušen a až pak vložen do sady sít.

Vlhkost zemin se vypočítala z hmotnosti vzorku před a po vysušení dle vzorce:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \times 100 [\%]$$

w je vlhkost v [%]

m_w hmotnost vlhkého vzorku v [g]

m_s hmotnost suchého vzorku v [g]

Výsledky byly zaznamenány do tabulek (viz tab. 2, 4, 6).

4.2.3 Promývání jemnozrnné zeminy

Zkušební vysušená navážka jemnozrnné zeminy se vsypala do sady sít začínajících na velikosti 4 mm a promývala se síty do té doby, než byly odplaveny všechny jemné částice menší než 0,063 mm. Síta se umístila tak, aby roztok, který protékal posledním sítem mohl odtékat do odpadu (viz obr. 14). Promývání bylo časově náročné, protože jemnozrnná zemina obsahovala velké množství velice jemných částic. Po promývání byla síta spolu s promytou jemnozrnnou zeminou vložena do sušárny, aby došlo k vysušení vzorku na ustálenou hmotnost.



Obrázek 14: Promývání jemnozrnné zeminy

4.2.4 Prosévání vzorků

Vypraný (pouze u jemnozrnné zeminy) a vysušený vzorek se nasypal na síta, která byla sestavena do sloupce (viz obr. 15). Nahoru sloupce se umístilo síto s největšími otvory o velikosti 16 mm a opatřilo se víkem. Nejmenší zrna byla zachycena na spodním síti 0,063 mm a pod tímto sítem bylo dno. Sadu obsahovalo celkem 11 sít.

Po uzavření sít víkem se zapnulo prosévací zařízení, které mechanicky třáslo s celým sloupcem, čímž se materiál rozdělil na jednotlivé frakce. Nejdříve se odebralo síto s největšími otvory. Pro stoprocentním prosetí tímto sítem se také provedlo dodatečné ruční prosévání, přičemž se pod síto vložilo dno, aby nedošlo ke ztrátám. Všechnen materiál, který propadl sítem se přidal na další síto ve sloupci a zrna, která na síti zůstala se zvážila. Poté se odebralo další síto. Celý proces se opakoval, dokud nebyly zváženy všechny zbytky zachycené na jednotlivých sítích. Nakonec se zvážily i jemné částice $<0,063$ mm, které propadly až na samotné dno sloupce. Vše bylo zaznamenáno do tabulky (viz tab. 3, 5, 7). Výsledky byly poté vyneseny do grafu (viz graf 1, 2, 3). [31] [32]



Obrázek 4: Prosévací zařízení se sadou sít



Obrázek 16: Zůstatky hrubozrnné zeminy na sítích 16; 8; 5,6; 2; 0,5; 0,125

4.2.5 Výsledky zkoušek

➤ Hrubozrnná zemina

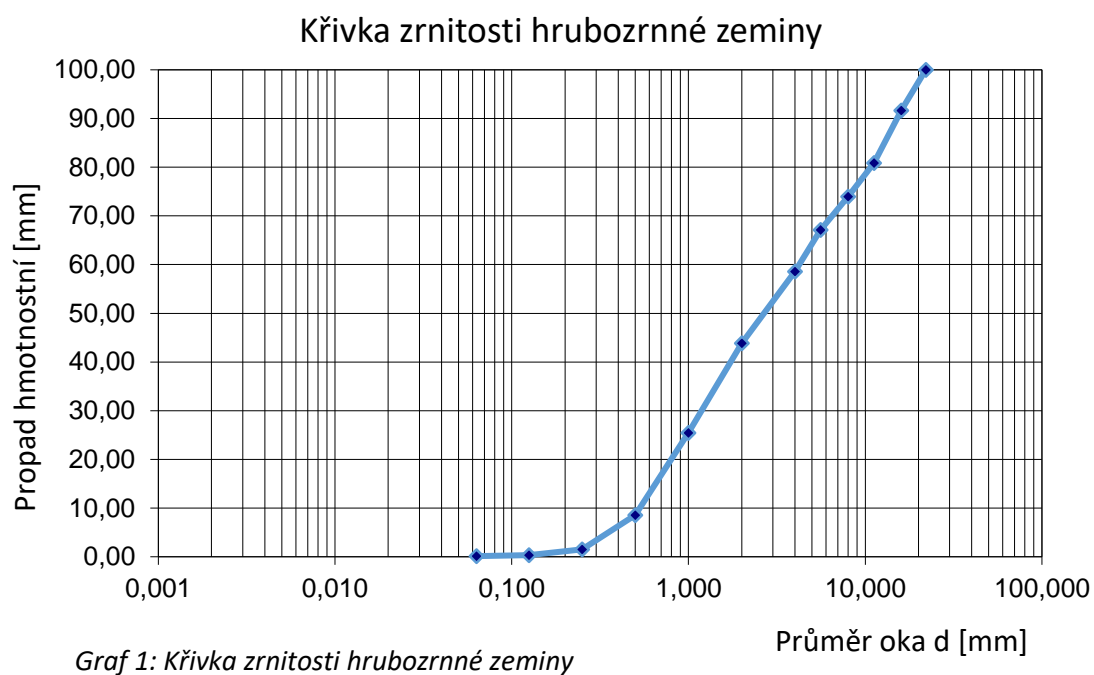
Tabulka 2: Výpočet vlhkosti hrubozrnné zeminy

Vzorek	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po vysušení [g]	Obsah vody [g]	Vlhkost [%]
Hrubozrnná zemina	500	473,1	26,9	5,69

Tabulka 3: Stanovení zrnitosti hrubozrnné zeminy

Hrubozrnná zemina			
Vel. síta	Na síť [g]	Na síť [%]	Procento propadu [g]
22,000	0,00	0,00	100,00
16,000	38,60	8,33	91,67
11,200	50,20	10,83	80,84
8,000	31,90	6,88	73,96
5,600	31,70	6,84	67,12
4,000	39,50	8,52	58,60
2,000	68,40	14,76	43,84
1,000	85,40	18,43	25,42

0,500	78,10	16,85	8,57
0,250	32,70	7,06	1,51
0,125	5,60	1,21	0,30
0,063	0,80	0,17	0,13
0	0,60	0,13	0,00
$\Sigma=$	463,50	100,00	



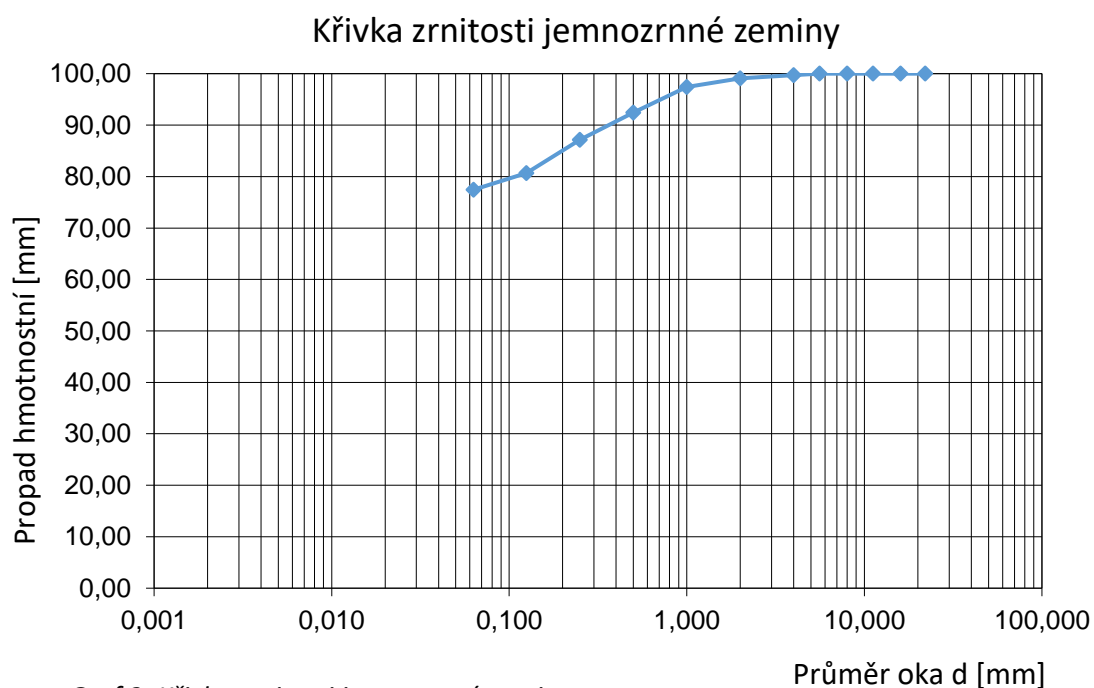
➤ Jemnozrnná zemina

Tabulka 4: Výpočet vlhkosti jemnozrnné zeminy

Vzorek	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po vysušení [g]	Obsah vody [g]	Vlhkost [%]
Jemnozrnná zemina	500	483,2	16,8	3,48

Tabulka 5: Stanovení zrnitosti jemnozrnné zeminy

Jemnozrnná zemina			
Vel. síta	Na síti [g]	Na síti [%]	Procento propadu [g]
22,000	0,00	0,00	100,00
16,000	0,00	0,00	100,00
11,200	0,00	0,00	100,00
8,000	0,00	0,00	100,00
5,600	0,00	0,00	100,00
4,000	1,30	0,27	99,73
2,000	3,20	0,66	99,07
1,000	7,90	1,63	97,43
0,500	24,30	5,03	92,40
0,250	25,50	5,28	87,13
0,125	31,30	6,48	80,65
0,063	15,50	3,21	77,44
0	374,20	77,44	0,00
$\Sigma=$	483,20	100,00	



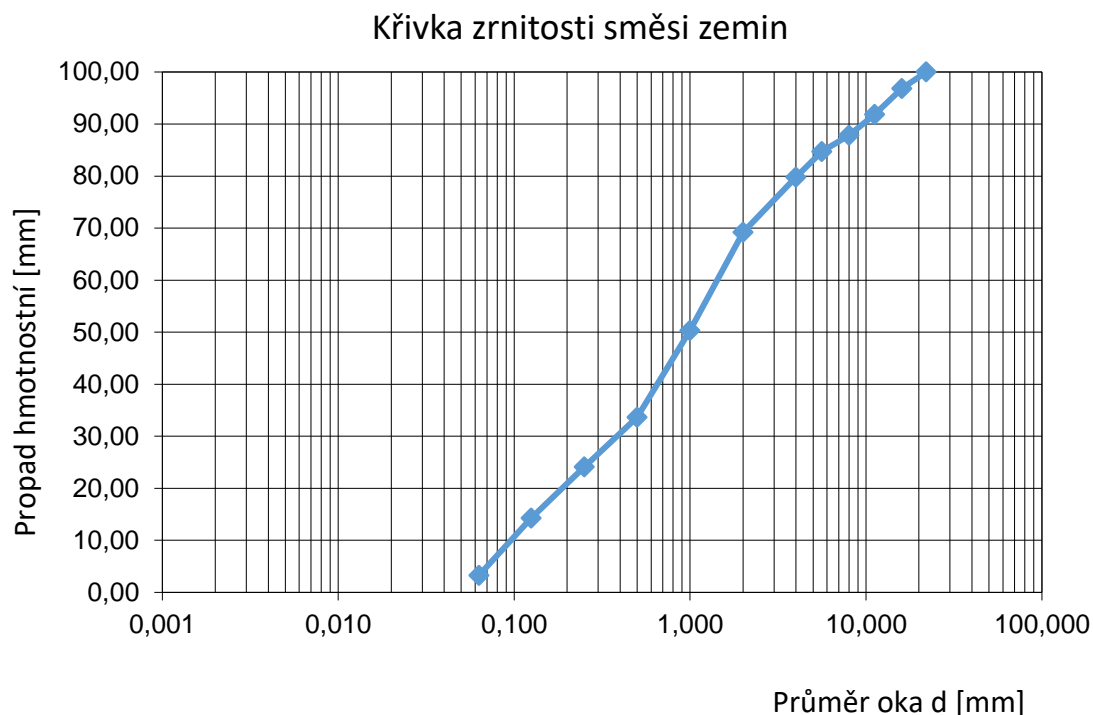
➤ **Směs zemin** (v poměru 1:1)

Tabulka 6: Výpočet vlhkosti směsi zemin

Vzorek	Původní hmotnost [g]	Hmotnost po vysušení [g]	Obsah vody [g]	Vlhkost [%]
Směs zemin	500	471,5	28,5	6,04

Tabulka 7: Stanovení zrnitosti směsi zemin

Směs zemin			
Vel. síta	Na síť [g]	Na síť [%]	Procento propadu [g]
22,000	0,00	0,00	100,00
16,000	15,00	3,18	96,82
11,200	23,60	5,01	91,81
8,000	18,60	3,94	87,87
5,600	14,80	3,14	84,73
4,000	23,30	4,94	79,79
2,000	49,90	10,58	69,20
1,000	88,90	18,85	50,35
0,500	78,70	16,69	33,66
0,250	45,10	9,57	24,09
0,125	46,40	9,84	14,25
0,063	51,80	10,99	3,27
0	15,40	3,27	0,00
Σ=	471,50	100,00	



Graf 3: Křivka zrnitosti směsi zemin

Z jednotlivých křivek zrnitosti bylo možné vyčíst procentuální zastoupení jemných částic **f**, písčité složky **s** (sand) a šterkové složky **g** (gravel). Hodnoty byly zapsány do tabulek (viz tab. 8, 9, 10) a následně vyneseny do trojúhelníkového diagramu zrnitosti (viz graf 4), a na základě toho byla zemina pojmenována.

Tabulka 8: Složky hrubozrnné zeminy

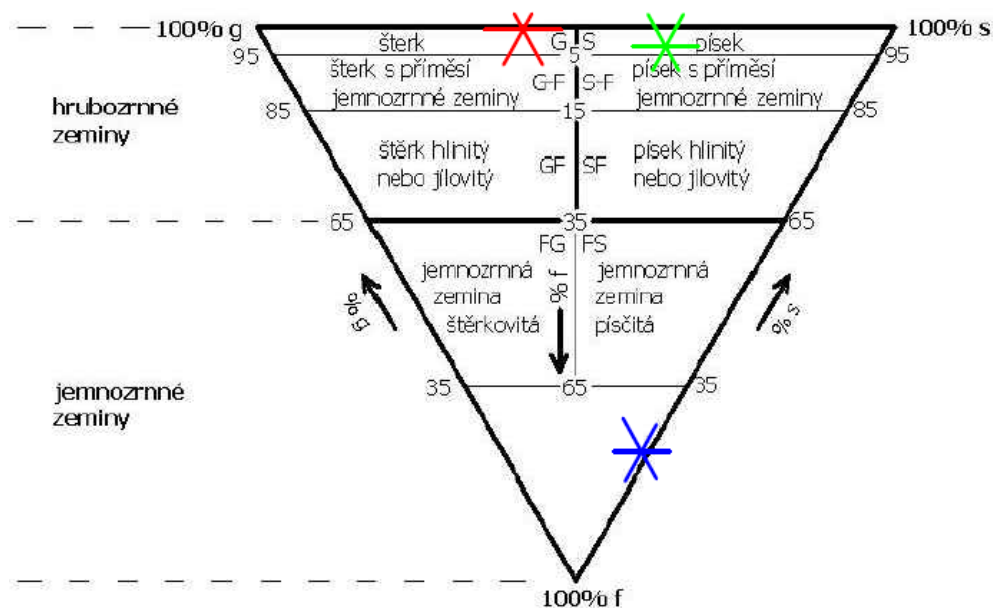
Hrubozrnná zemina	
g	56,16
s	43,71
f	0,13
Σ=	100,00

Tabulka 9: Složky jemnozrnné zeminy

Jemnozrnná zemina	
g	0,93
s	21,63
f	77,44
Σ=	100,00

Tabulka 10: Složky směsi zemin

Směs zemin	
g	30,80
s	65,94
f	3,27
Σ=	100,00



Graf 4: Trojúhelníkový diagram zrnitosti se zatříděním zemin [33]

Vysvětlivky barev a výsledky z diagramu (viz graf 4):

- Hrubozrnná zemina – šterk G
- Jemnozrnná zemina – jíl se střední plasticitou F6CI
- Směs zemin – písek S

- Vhodnost použití pro pozemní komunikace dle ČSN 73 6133 [34]

Šterk **G** a písek **S** – jsou vhodné k přímému použití bez úpravy do aktivní zóny
i násypu (lze použít přímo bez úpravy)

Jíl se střední plasticitou **F6CI**

– je nevhodný k přímému použití bez úpravy do aktivní zóny (musí se vždy upravit)

– podmíněčně vhodný k přímému použití bez úpravy do násypu (podle dalších

vlastností se rozhodne, zda lze použít přímo bez úpravy nebo zda se musí upravit)

4.3 Zhutnitelnost zemin – Proctorova zkouška

4.3.1 Podstata zkoušky

Tato zkouška slouží ke zjištění vzájemného vztahu mezi vlhkostí a objemovou hmotností hydraulicky stmelených nebo nestmelených směsí po zhutnění.

Při hutnění jsou póry mezi většími zrny postupně vyplňovány menšími zrny, a tím dochází ke zvýšení objemové hmotnosti. Objemová hmotnost však neroste do nekonečna, je úzce spojená s vlhkostí. Pokud začne voda vyplňovat póry mezi zrny, účinek hutnění klesá. [35]

Postup hutnění je popsán v normě ČSN EN 13286-2 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška. Zde můžeme vybrat mezi Proctorovou zkouškou standardní nebo modifikovanou, při které se dosahuje mnohem větší míry zhutnění.

Cílem je najít tzv. optimální vlhkost w_{opt} , při které se dosáhne maximální objemové hmotnosti zeminy $\rho_{d,max}$, a tedy maximálního zhutnění.

4.3.2 Postup v laboratoři

V laboratoři se postupovalo v souladu s ČSN EN 13286-2. Pro stanovení optimální vlhkosti byla vybrána metoda Proctor modifikovaný.

Nejprve bylo nutné zvážít 12 vzorků (4 pro každý typ zeminy), každý o hmotnosti 2,5 kg. Do vzorků se přidalo odlišné množství vody. Vlhkost se přidávala na základě odhadu tak, aby bylo možné zjistit z konečných výsledků hledanou optimální vlhkost. Každý vzorek se pečlivě promíchal a nechal několik hodin ve vzduchotěsném obalu. Po odležení se přešlo k samotné zkoušce.

Zemina byla zhutněna ve třech vrstvách v Proctorově formě typu A o průměru 100 mm a výšce 120 mm (viz obr. 17). Každá vrstva byla hutněna 25 údery pěchu vážícího 2,5 kg a dopadajícího z výšky 457 mm. Po zhutnění se odstranil horní nástavec formy, zemina se zarovнала s okrajem formy a zvážila. Následně se forma rozebrala

a z jádrové oblasti se odebral vzorek pro stanovení vlhkosti (viz obr. 18, 19). Ten se nejprve zvážil a pak byl vložen do sušárny. Po vysušení na ustálenou hmotnost se opět zvážil. [2]



Obrázek 5: Hutnění zeminy Proctorovou metodou



Obrázek 6: Zhutněná jemnozrnná zemina



Obrázek 19: Odběr vzorků pro zjištění vlhkosti

Vlhkost w se stanovila pomocí vztahu:

$$w = \frac{m_w - m_s}{m_s} \times 100$$

w je vlhkost v [%]

m_w hmotnost vlhkého vzorku v [g]

m_s hmotnost suchého vzorku v [g]

Objemová hmotnost zhutněné suché směsi ρ_d se vypočítala podle [2]:

$$\rho_d = \frac{(100 \times \rho)}{(100 + w)}$$

ρ_d je objemová hmotnost zhutněné suché směsi v [kg/m³]

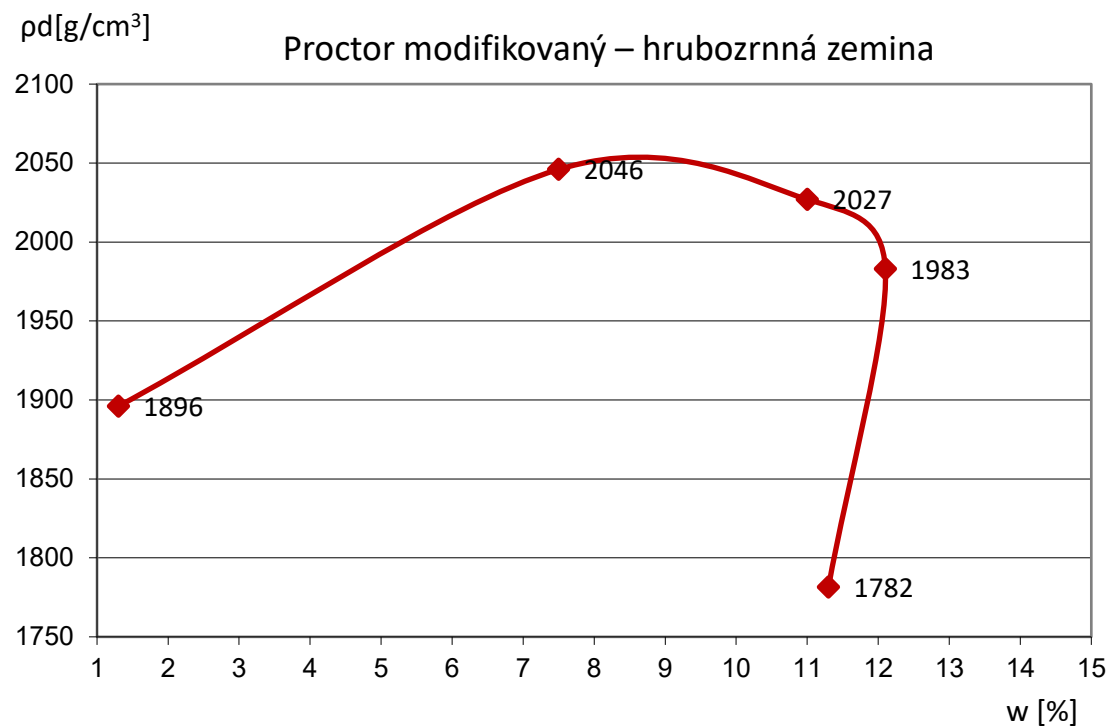
ρ objemová hmotnost zhutněné vlhké směsi v [kg/m³]

w vlhkost směsi v [%]

Na základě jednotlivých vlhkostí a jím odpovídajících objemových hmotností mohly být výsledky vyneseny do grafu, do tzv. Proctorovy křivky (viz graf 5, 6, 7).

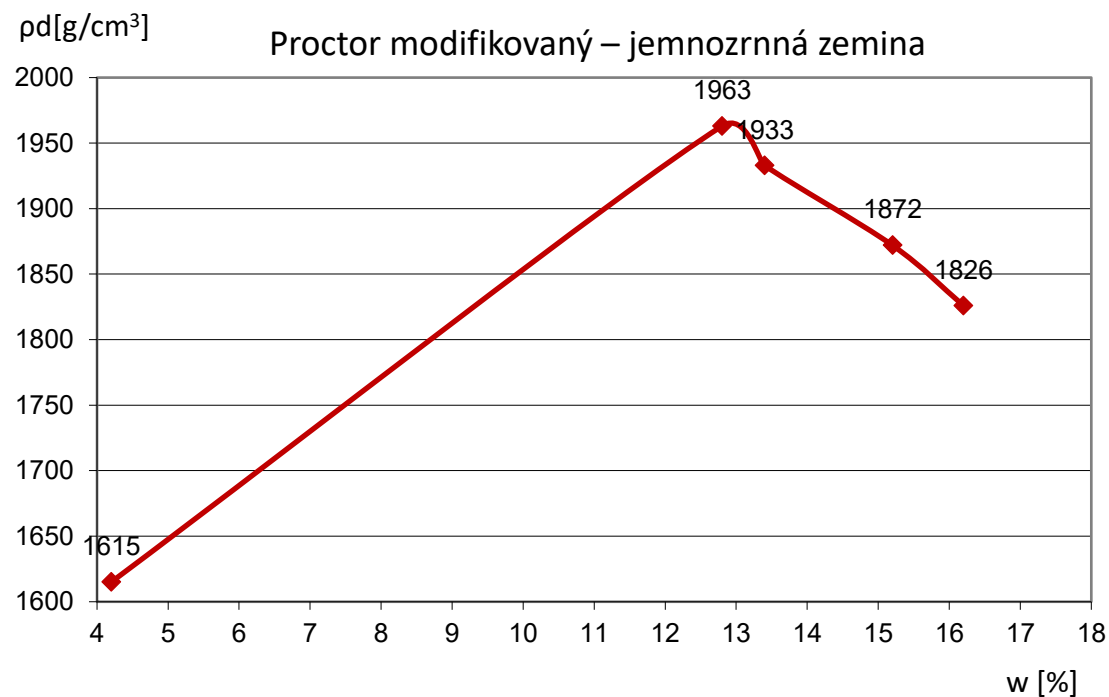
4.3.3 Vyhodnocení zkoušky

➤ Hrubozrnná zemina



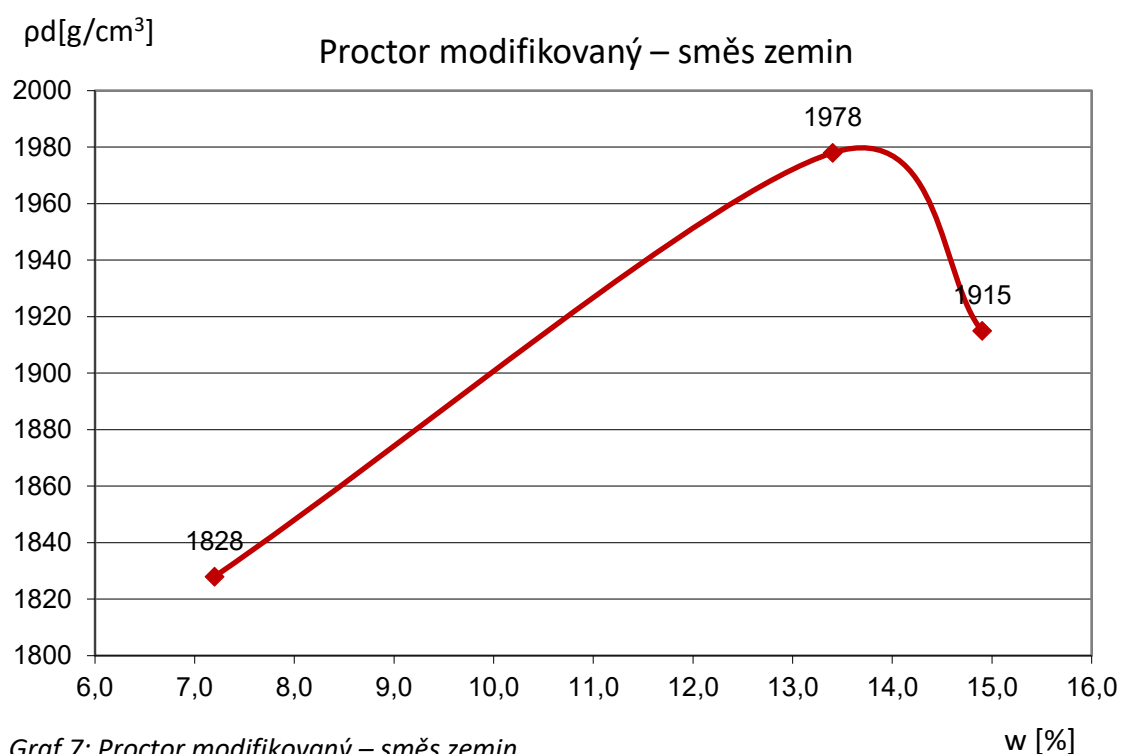
Graf 5: Proctor modifikovaný – hrubozrnná zemina

➤ Jemnozrnná zemina



Graf 6: Proctor modifikovaný – jemnozrnná zemina

➤ Směs zemin



Graf 7: Proctor modifikovaný – směs zemin

Z Proctorových křivek se daly přibližně zjistit optimální vlhkosti, ty byly zaznamenány přehledně do tabulky (viz tab. 11).

Tabulka 11: Optimální vlhkosti

Optimální vlhkost w [%]	
Hrubozrnná zemina	8,55
Jemnozrnná zemina	13,00
Směs zemin	13,70

4.4 CBR – kalifornský poměr únosnosti

CBR (Californication bearing ratio) je penetrační zkouška, která byla vyvinuta v Kalifornii již před 2. světovou válkou. Dříve byla využívána především pro měření únosnosti základových vrstev zemin při stavbě silnic. Dnes slouží mimo jiné, jako kontrolní zkouška pro zjištění únosnosti konstrukčních vrstev vozovky nebo jejího podloží a pro stanovení vhodnosti materiálu při návrhu vozovek, chodníků, a jiných dopravních ploch.

4.4.1 Podstata zkoušky

CBR vyjadřuje odolnost zhutněné zeminy proti pronikání ocelového trnu Ø 50 mm zatlačovaného konstantní rychlostí přibližně 1,27mm/min. Srovnává pevnost zkoušené zeminy s normovým kamenivem – drceným vápencem, který má hodnotu CBR= 100 %. Hodnota CBR vyjádřená v procentech je tedy poměr síly, kterou je potřeba vyvinout k zatlačení trnu do stanovené hloubky ke známé síle (viz tab. 12) potřebné k zatlačení trnu do stejné hloubky do normového materiálu. [36]

CBR se vypočítá pomocí tohoto vztahu:

$$CBR = \frac{F}{F_s} \times 100 \quad [\%]$$

CBR je index užívaný pro stanovení charakteristik únosnosti směsi stanový ihned po zhutnění nebo po době zrání [%]

F síla potřebná k zatlačení trnu do stanovené hloubky ve zkoušené zemině [kN]

F_s standardní síla potřebná k zatlačení trnu do stanové hloubky v normovém kamenivu [kN]

Tabulka 12: Hodnoty standardních sil pro normové kamenivo

Penetrace [mm]	Standardní síla [kN]
2,5	13,2
5	20

Norma uvádí i tzv. **okamžitý index únosnosti IBI**, což je rychlejší varianta CBR bez nutnosti zrání vzorku. Zkouška probíhá ihned po zhutnění a bez přitěžovacích prstenců. V případě zemin upravených hydraulickými pojivy musí zkouška proběhnout do 90 minut po smíchání směsi. [3]

4.4.2 Postup v laboratoři

Zkoušení v laboratoři probíhalo podle normy ČSN EN 13286-47 Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání.

Pro jednu zkoušku CBR bylo potřeba připravit 7 kg zeminy, navlhčit ji na optimální vlhkost (viz tab. 13), která byla zjištěna v předchozím měření Proctorovou zkouškou, a pořádně promíchat. Aby se zajistilo rovnoměrné provlhčení jemnozrnné zeminy, byla nádoba s jejím obsahem vložena do vzduchotěsného obalu po dobu přibližně dvou dnů.

Tabulka 13: Vzorky připravené ke zkoušení IBI/CBR

Vzorky pro zkoušku IBI/CBR		
	pojivo	optimální vlhkost [%]
Hrubozrnná zemina		8,55
Hrubozrnná zemina	+ 2 % cementu	8,55
Jemnozrnná zemina		13,00
Jemnozrnná zemina	+ 2 % vápna	13,00
Směs zemin		13,70

Optimálně navlhčená zemina se poté ve třech vrstvách zhutnila v Proctorově formě pěstem o hmotnosti 2,5 kg, který dopadal z výšky 305 mm. Každá vrstva se hutnila 56 údery. Moždíř měl průměr 150 mm, výšku 120 mm a byl opatřen nástavcem (viz obr. 20). Poslední hutněná vrstva musela být připravena tak, aby se její povrch po odstranění nástavce nacházel nad okrajem formy. Tato přebytečná zemina se následně seřízla a její povrch se zarovnal s okrajem formy (viz obr. 21). Případné díry, které mohly vzniknout při zarovnávání se opravily. Zhutněná zemina byla připravena ke zkoušce IBI. [37]



Obrázek 7: Proctorova forma s nástavcem a zhutněnou hrubozrnnou zeminou



Obrázek 21: Zhutněná jemnozrnná zemina v Proctorově formě připravená na zkoušku IBI

4.4.3 Zkouška IBI

Zhutněný vzorek se vložil do středu lisu a na jeho povrch velice jemně dosedl zatěžovací trn o průměru 50 mm (viz obr. 22). Poté započala samotná zkouška, kdy se trn rychlostí 1,27 mm/min vtlačoval do zhutněné zeminy. Všechny naměřené hodnoty se zaznamenávaly do počítače. Měření probíhalo do penetrace 8 mm. Srovnávací hodnoty potřebné k výpočtu byly na úrovni 2,5 mm a 5 mm.

4.4.4 Zkouška CBR

Jeden vzorek byl podroben oběma zkouškám. Po skončení IBI se vzorek otočil vzhůru nohama a vložil do nádoby s vodou, která umožnila celé ponoření sestavy. Na rozdíl od rychlého zjištění únosnosti pomocí zkoušky IBI musel vzorek zrát. U vzorků bez pojiva stačila saturace 4 dny ve vodě. Vzorky s pojivem (vápno, cement) nejprve zrály 3 dny na vzduchu a potom satureovaly 4 dny ve vodě. Zkouška CBR probíhala stejně jako zkouška IBI (viz obr. 23, 24). [37] Podle normy se měl použít přitěžovací prstenec, ten ale v laboratoři nebyl k dispozici. Vedoucí práce proto rozhodl, že se zkouška uskuteční bez těchto laboratorních pomůcek.



Obrázek 22: Lis pro měření IBI a CBR



Obrázek 8: Zkouška CBR u hrubozrnné zeminy zlepšené 2 % cementu

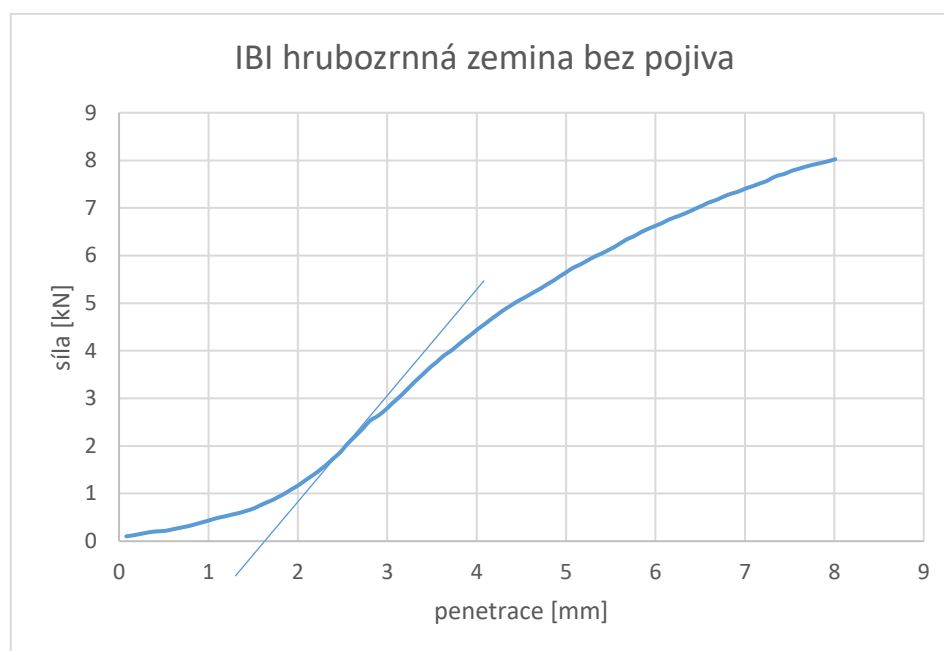


Obrázek 24: Výsledek zkoušky CBR u hrubozrnné zeminy zlepšené 2 % cementu

4.4.5 Vyhodnocení zkoušky IBI a CBR

Naměřené hodnoty penetrace a síly byly vyneseny do grafů a vzniklé body se proložily křivkou. Z křivky byly odečteny hodnoty síly odpovídající penetraci 2,5 mm a 5 mm a ty se vyjádřily v procentech referenčních sil těchto penetrací, tj. 13,2 kN a 20 kN. Vyšší procento je hodnotou IBI/CBR. [3]

➤ Hrubozrnná zemina bez pojiva

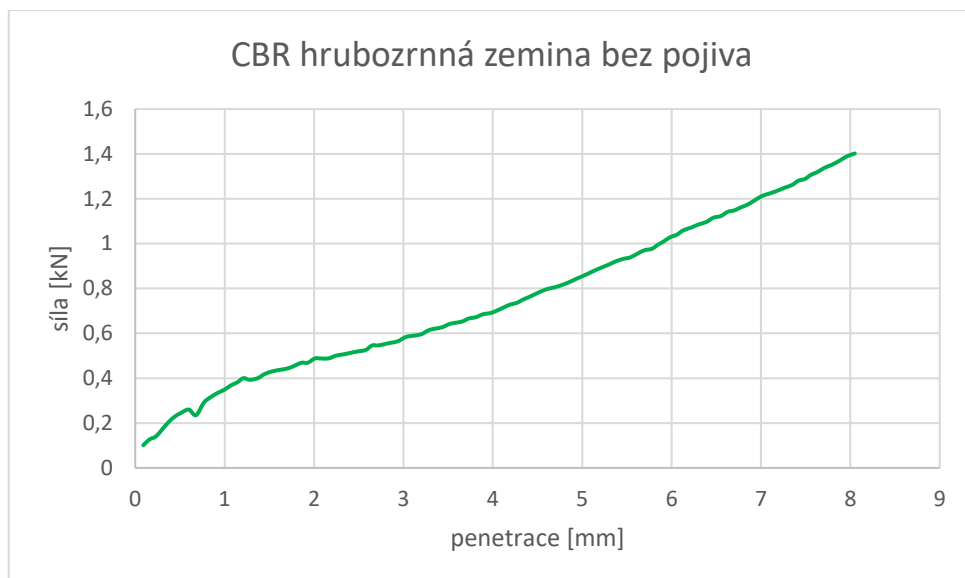


Graf 8: IBI – křivka síly/penetrace – hrubozrnná zemina bez pojiva

Tato křivka má nestandardní tvar, musela se provést korekce počátku podle normy ČSN EN 13286-47.

Tabulka 14: Výsledné IBI u hrubozrnné zeminy bez pojiva

Penetrace [mm]	Naměřená síla [kN]	Standardní síla [kN]	IBI [%]
2,5	4,04	13,2	30,61
5	6,87	20	34,35



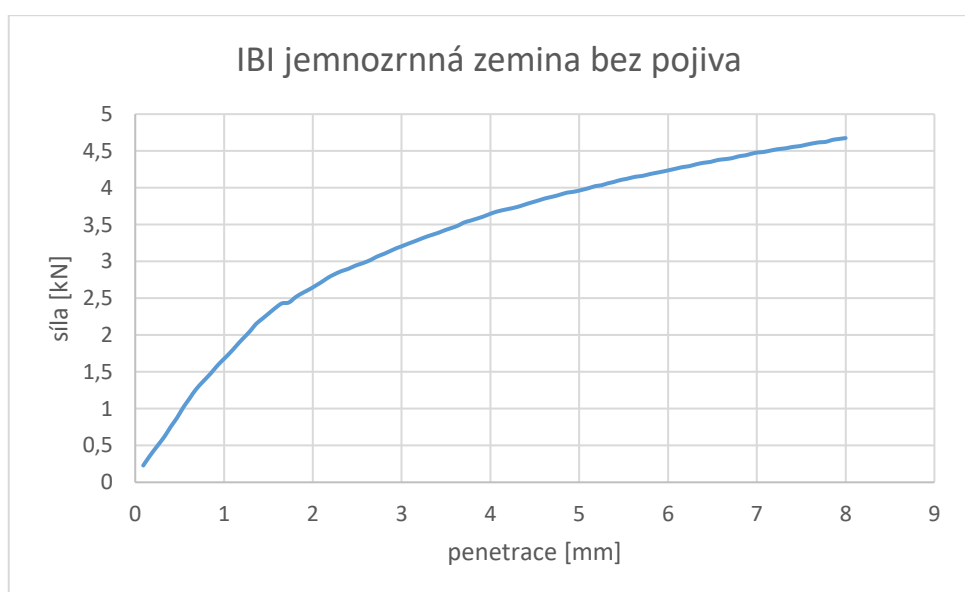
Graf 9: CBR – křivka síly/penetrace – hrubozrnná zemina bez pojiva

Tabulka 15: Výsledné CBR u hrubozrnné zeminy bez pojiva

Penetrace [mm]	Naměřená síla [kN]	Standardní síla [kN]	CBR [%]
2,5	0,52	13,2	3,94
5	0,86	20	4,30

Po 4 dnech saturace ve vodě došlo ke snížení únosnosti hrubozrnné zeminy.

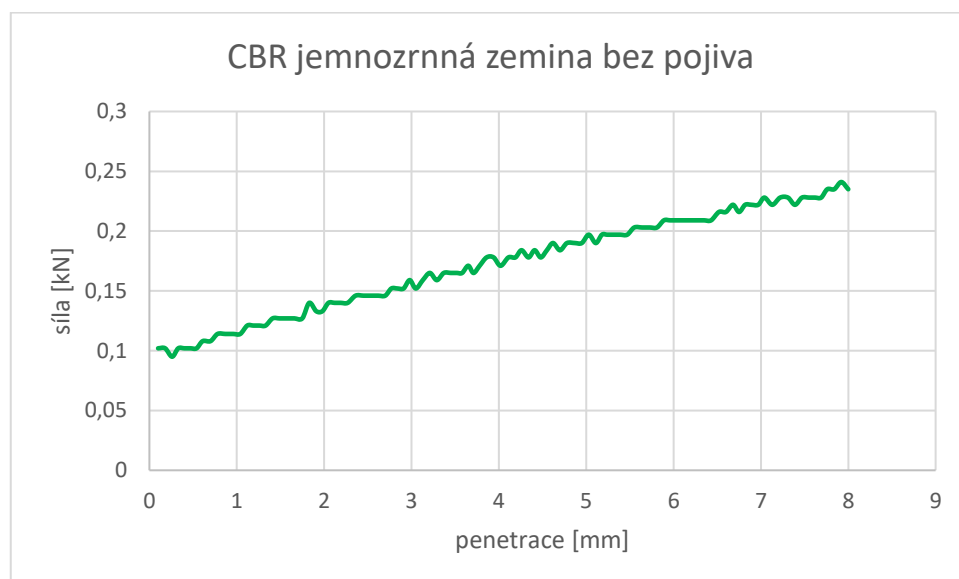
➤ Jemnozrnná zemina bez pojiva



Graf 10: IBI – křivka síly/penetrace – jemnozrnná zemina bez pojiva

Tabulka 16: Výsledné IBI u jemnozrnné zeminy bez pojiva

Penetrace [mm]	Naměřená síla [kN]	Standardní síla [kN]	IBI [%]
2,5	2,96	13,2	22,42
5	3,98	20	19,90



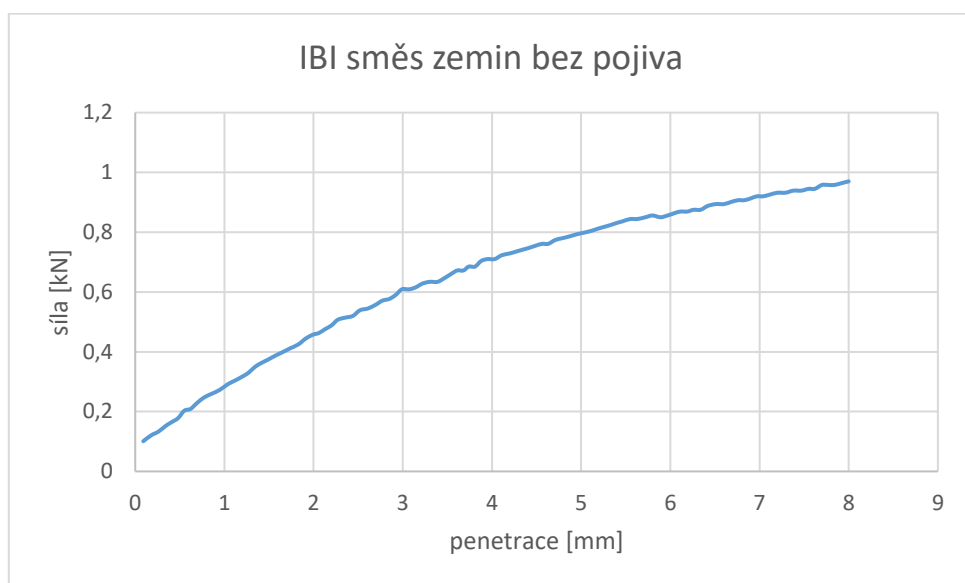
Graf 11: CBR – křivka síly/penetrace – jemnozrnná zemina bez pojiva

Tabulka 17: Výsledné CBR u jemnozrnné zeminy bez pojiva

Penetrace [mm]	Naměřená síla [kN]	Standardní síla [kN]	CBR [%]
2,5	0,15	13,2	1,14
5	0,20	20	1,00

Po 4 dnech saturace ve vodě došlo k výraznému snížení únosnosti jemnozrnné zeminy.

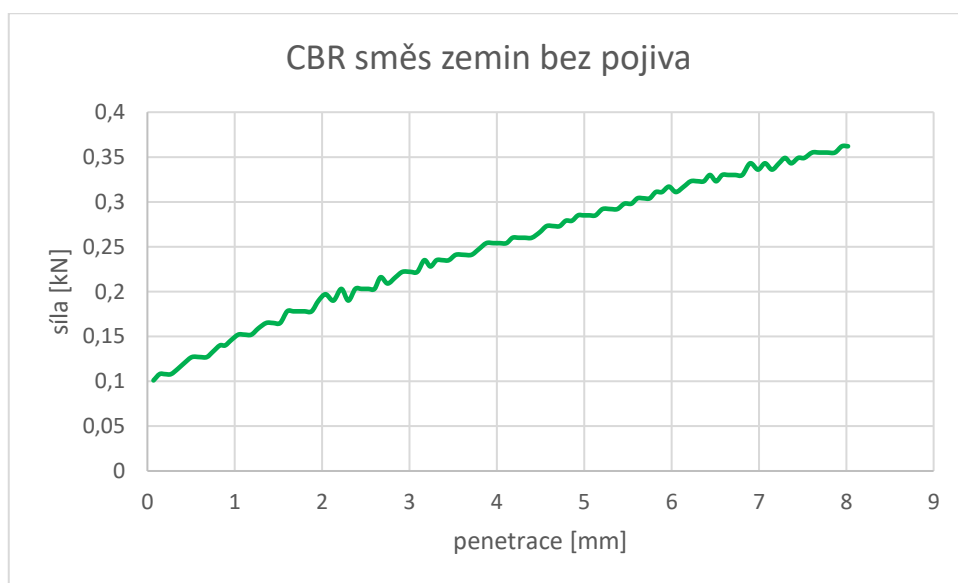
➤ **Směs zemin bez pojiva**



Graf 12: IBI – křivka síly/penetrace – směs zemin bez pojiva

Tabulka 18: Výsledné IBI u směsi zemin bez pojiva

Penetrace [mm]	Naměřená síla [kN]	Standardní síla [kN]	IBI [%]
2,5	0,53	13,2	4,02
5	0,8	20	4,00



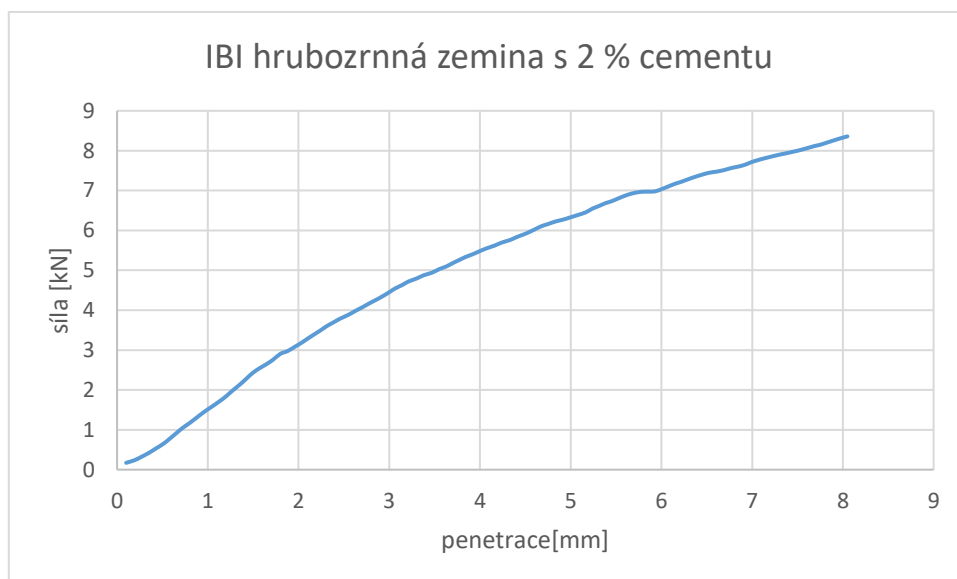
Graf 13: CBR – křivka síly/penetrace – směs zemin bez pojiva

Tabulka 19: Výsledné CBR u směsi zemin bez pojiva

Penetrace [mm]	Naměřená síla [kN]	Standardní síla [kN]	CBR [%]
2,5	0,20	13,2	1,52
5	0,28	20	1,40

Po 4 dnech saturace ve vodě došlo ke snížení únosnosti směsi zemin. Změna nebyla tak výrazná jako u předchozích dvou vzorků, mísením hrubozrnné a jemnozrnné zeminy v poměru 1:1 došlo k mechanické úpravě. Výsledek CBR byl ale nedostačující. Hodnota CBR v podloží musí být minimálně 10 %.

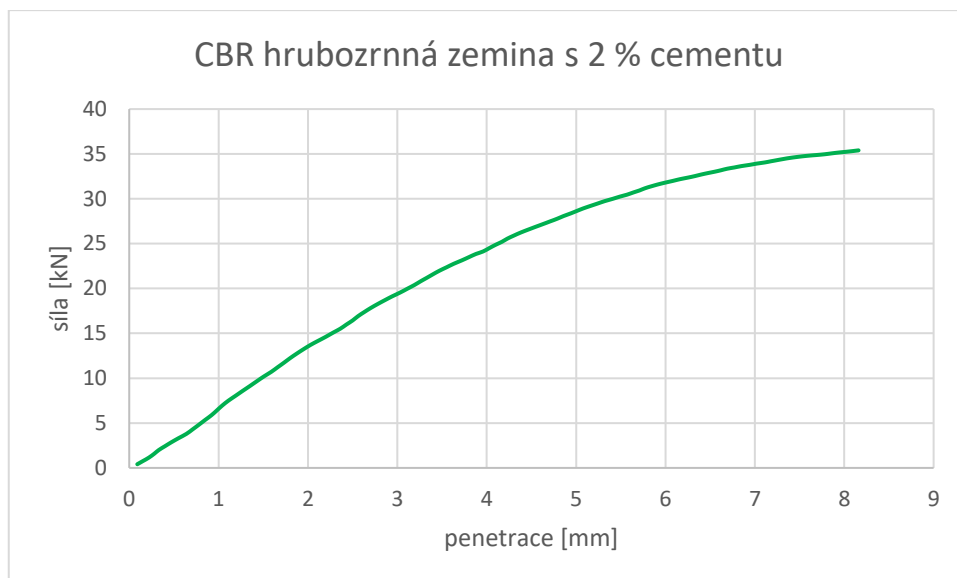
➤ Hrubozrnná zemina s pojivem



Graf 14: IBI – křivka síly/penetrace – hrubozrnná zemina s 2 % cementu

Tabulka 20: Výsledné IBI u hrubozrnné zeminy s 2 % cementu

Penetrace [mm]	Naměřená síla [kN]	Standardní síla [kN]	IBI [%]
2,5	4,12	13,2	31,21
5	6,52	20	32,60



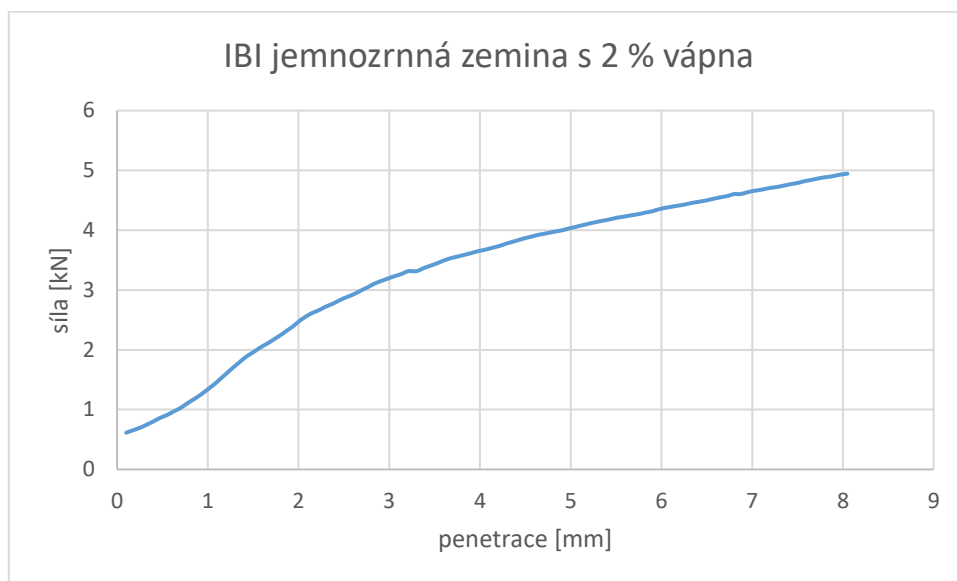
Graf 15: CBR – křivka síly/penetrace – hrubozrnná zemina s 2 % cementu

Tabulka 21: Výsledné CBR u hrubozrnné zeminy s 2 % cementu

Penetrace [mm]	Naměřená síla [kN]	Standardní síla [kN]	CBR [%]
2,5	16,45	13,2	124,62
5	28,76	20	143,80

Hrubozrnná zemina s příměsí 2 % cementu nejprve zrála 3 dny na vzduchu, a potom saturovala 4 dny ve vodě. Z výsledků jde vidět, že díky hydrataci cementu během doby zrání došlo k velkému nárůstu únosnosti. Hodnoty CBR se zvýšily oproti původním hodnotám IBI více jak 4x.

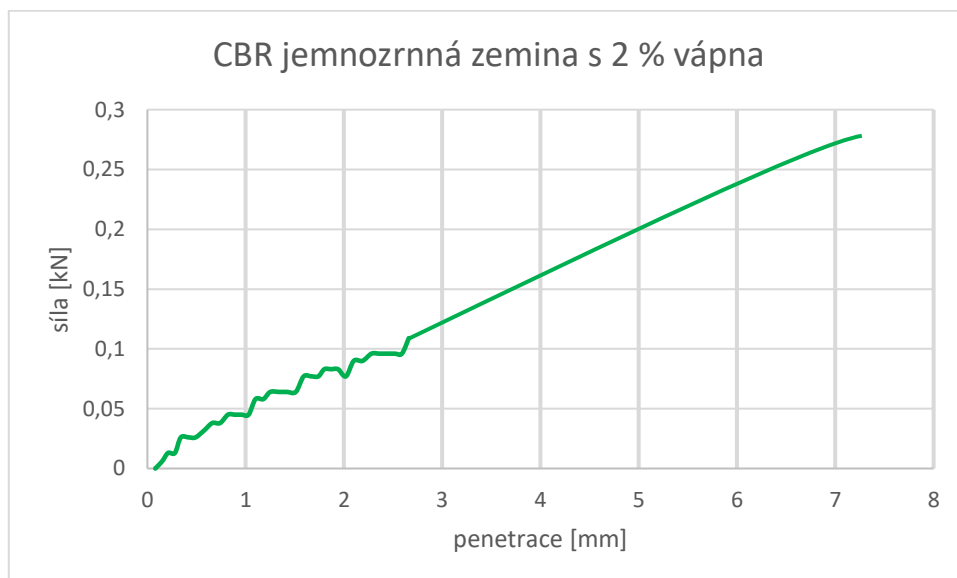
➤ Jemnozrnná zemina s pojivem



Graf 16: IBI – křivka síly/penetrace – jemnozrnná zemina s 2 % vápna

Tabulka 22: Výsledné IBI u jemnozrnné zeminy s 2 % vápna

Penetrace [mm]	Naměřená síla [kN]	Standardní síla [kN]	IBI [%]
2,5	2,88	13,2	21,82
5	4,04	20	20,20



Graf 17: CBR – křivka síly/penetrace – jemnozrnná zemina s 2 % vápna

Tabulka 23: Výsledné CBR u jemnozrnné zeminy s 2 % vápna

Penetrace [mm]	Naměřená síla [kN]	Standardní síla [kN]	CBR [%]
2,5	0,10	13,2	0,76
5	0,20	20	1,00

Jemnozrnná zemina s příměsí 2 % vápna zrála 3 dny na vzduchu, a potom saturovala 4 dny ve vodě. Jak je ale z výsledků patrné, výsledné hodnoty jsou srovnatelné s hodnotami jemnozrnné zeminy bez pojiva. Očekával se nárůst CBR oproti původní hodnotě IBI díky pucolánové reakci, ta ale neproběhla. Chyba byla způsobená použitím nevhodného, starého vápna, které bylo již vyhašené a nereaktivní. Aby se potvrdila tato úvaha byla vyzkoušena reaktivita vápna. Zkouška reaktivity se provádí podle EN 459-2, teplota suspenze vápna s vodou se musí zvýšit za 25 min minimálně na 60 °C. V mém případě vzrostla teplota jen minimálně, dosáhla přibližně 23,6 °C (viz obr. 25).



Obrázek 25: Zkouška reaktivity vápna

5 Závěr

V teoretické části bakalářské práce byly vysvětleny základní pojmy týkající se úpravy zemin. Dále zde byly popsány dva základní postupy úpravy, a to jak mechanická úprava, tak úprava s využitím pojiv. Jednotlivá pojiva byla charakterizována dle TP 94 – Úprava zemin. V České republice se můžeme v největší míře setkat s používáním hydraulických pojiv – vápna a cementu. Jedná se o pojiva, která se na našem trhu vyskytují již řadu let, ale kvůli rostoucí ceně roste i poptávka po jiných možnostech úpravy. Část teoretické práce byla věnována zkušenostem ze zahraničí. Zajímavostí jsou informace o nových technologiích, provedených zkouškách nebo o zlepšení zemin, které se u nás nevyskytují. Pro technologie úpravy zemin v podloží vozovek to může být inspirace dalšího vývoje v ČR.

V praktické části byly popsány, zaznamenány a vyhodnoceny zkoušky, které probíhaly v laboratoři pozemních komunikací. Zkoušely se tři odlišné vzorky zemin. První zkouška sloužila k jejich klasifikaci podle ČSN 7361 33. Hrubozrnná zemina byla vyhodnocena jako štěrk, jemnozrnná zemina jako písek a směs obou těchto zemin jako jíl se střední plasticitou. Poté se přešlo k další zkoušce – Proctor modifikovaný. Cílem bylo najít tzv. optimální vlhkost w_{opt} , při které se dosáhlo maximální objemové hmotnosti zeminy $\rho_{d,max}$, a tedy maximálního zhutnění. Výsledky z Proctorovy zkoušky se použily na poslední, nejdůležitější zkoušky, IBI a CBR. Vzorky byly navlhčeny na optimální vlhkost a zhutněny v Proctorově formě. Byla stanovena únosnost neupravených zemin, směsi zeminy (smícháním jemnozrnné a hrubozrnné zeminy proběhlo mechanické zlepšení) a dvou vzorků upravených pojivy. Pro úpravu se použily 2 % cementu pro zlepšení hrubozrnné zeminy a 2 % vápna přimíchané do jemnozrnné zeminy.

Jak je vidět z výsledků v tab. 24, nejvyšších hodnot IBI dosáhla hrubozrnná zemina bez pojiva, a to 34 %. Nejnižších hodnot dosáhla směs zemin 4 %.

Tabulka 24: Celkové vyhodnocení IBI a CBR všech zkoušených vzorků

	IBI [%]	CBR [%]
Hrubozrnná zemina bez pojiva	34	4
Jemnozrnná zemina bez pojiva	22	1
Směs zemin bez pojiva	4	2
Hrubozrnná zemina s 2 % cementu	33	144
Jemnozrnná zemina s 2 % vápna	22	1

Co se týče výsledků CBR, u všech vzorků kromě jednoho došlo vlivem nasycení vodou k poklesu únosnosti. Nejmenší pokles můžeme pozorovat u směsi zemin bez pojiva ze 4 na 2 %. Mechanická úprava nevhodné jemnozrnné zeminy jednoznačně nepodporuje zvýšení poměru únosnosti CBR (IBI). U zeminy upravené 2 % cementu se oproti hodnotám IBI zvýšila hodnota CBR více jak 4x. Tento nárůst pevnosti můžeme přičíst hydratační reakci cementu s vodou. Jak je patrné, a bylo již zmiňováno v předchozí kapitole, výsledky jemnozrnné zeminy bez vápna a s vápnem jsou totožné. Tato chyba je způsobená použitím nereaktivního vápna. Za normálních okolností by také v tomto případě nastalo zvýšení hodnoty CBR oproti původnímu IBI, ale ne tak výrazně jako u zeminy zlepšené cementem. Z toho plyne, že stabilizaci zemin ovlivňuje nejen množství a typ pojiva, které přidáváme, ale hlavně jeho kvalita. Proto vždy musíme provést předběžné laboratorní zkoušky, abychom se těmto chybám vyvarovali při aplikaci pojiv v terénu.

6 Seznamy

6.1 Seznam použitých zdrojů

- [1] TP 94 *Úprava zemin*. Praha: Ministerstvo dopravy, 2013.
- [2] ČSN EN 13286-2. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 2: Zkušební metody pro stanovení laboratorní srovnávací objemové hmotnosti a vlhkosti – Proctorova zkouška*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [3] ČSN EN 13286-47. *Nestmelené směsi a směsi stmelené hydraulickými pojivy – Část 47: Zkušební metoda pro stanovení kalifornského poměru únosnosti, okamžitého indexu únosnosti a lineárního bobtnání*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [4] PAVELKA, Ondřej, 2010. *Zlepšení mechanicko-fyzikálních vlastností zemin pomocí hydraulických pojiv*. Pardubice. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce doc. Ing. Vladimír DOLEŽEL, CSc.
- [5] ADÁMEK, Petr a VARGA, Zoltán, 2016. *Úprava nevhodných zemin v tělese zemních*. In: *asb-portal.cz* [online]. 4.8. [cit. 16.04.2017]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/geotechnika/uprava-nevhodnych-zemin-v-telese-zemnich>
- [6] *Lime & Cement Stabilisation Process*, 2014 [online]. [cit. 16.04.2017]. Dostupné z: <http://www.slggroup.com.au/lime-cement-stabilisation-process/>
- [7] KUDRNA, Jan. *Zemní práce. Vzděláváním ke kvalitě* [online]. 2011, 45 [cit. 16.04.2017]. Dostupné z: http://www.vzdelavanimkekvalite.cz/PDFs/Zemni_prace.pdf
- [8] VARAUS, Michal. *Pozemní komunikace II: Stmelené směsi a stmelené podkladní vrstvy, Upravené zeminy*. Brno, 2005.

- [9] *XRF/XRD Combined Instrumentation Can Provide Complete Quality Control of Clinker and Cement* [online]. [cit. 15.05.2017]. Dostupné z: <https://www.thermofisher.com/blog/mining/xrfxrd-combined-instrumentation-can-provide-complete-quality-control-of-clinker-and-cement/>
- [10] SOTORNÍK, Jan, Zkušenosti s novými pojivy Doroport a Dorosol. *Silnice železnice* [online]. 2/2016 [cit. 16.04.2017]. ISSN 1803-8441. Dostupné z: <http://www.silnice-zeleznice.cz/clanek/zkusenosti-s-novymi-pojivy-doroport-a-dorosol/>
- [11] *Perspektivní stavební materiály*, 2006 [online]. [cit. 16.04.2017]. Dostupné z: <http://www.enviweb.cz/printclanek/geologie/57375/>
- [12] SCHODE, Hans-Werner. Vlastnosti směsného pojiva ve srovnání s vápnem a cementem. *Straße+Autobahnt*. 2006.
- [13] *Geomříže TENAX, výztužná síťovina NOTEX, výztužný kompozit GEOTER*, 2014 [online]. [cit. 18.04.2017]. Dostupné z: <http://www.marcador.cz/index.php/produkty/geomrize>
- [14] ADAMEC, Jaroslav, 2013. Zakládání staveb – vyztužení násypů. In: *asb-portal.cz* [online]. 24.6. [cit. 18.04.2017]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/inzenyrske-stavby/geotechnika/zakladani-staveb-vyztuzeni-baze-nasypu>
- [15] DHANE, Gourav and KUMAR, Dhiraj. Geocell: An Emerging Technique Of Soil Reinforcement In Civil Engineering Field. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*. 59-63, ISSN: 2278-1684.
- [16] PANCAR, Erhan Burak and AKPINAR, Muhammet Vefa. Comparison of Effects of Using Geosynthetics and Lime Stabilization to Increase Bearing Capacity of Unpaved Road Subgrade. *Hindawi Publishing Corporation*. 2016, 1-8, ID 7129356.

- [17] WHITE, David J. Geocell Reinforcement of Subbase. *Draft*. 2013.
- [18] *Jak třídíme sklo a jak se dále využívá* [online]. [cit. 18.04.2017]. Dostupné z: <https://www.estav.cz/cz/3065.jak-tridime-sklo-a-jak-se-dale-vyuziva>
- [19] *Intelligent prefab with large boards cellular glass* [online]. [cit. 18.04.2017]. Dostupné z: <https://belglas.com/page/3/>
- [20] EMERSLEBEN, A. and MEYER, M. Sustainable pavement construction by the use of recycled glass. *International Journal of Geotechnical Engineering*. 2014, 8:4, 436-440, ISSN: 1938-6362.
- [21] *InfraCrete*, 2014 [online]. [cit. 13.05.2017]. Dostupné z: <http://infracrete.com/>
- [22] *Bórax en polvo* [online]. [cit. 15.05.2017]. Dostupné z: <http://www.granvelada.com/es/productos-quimicos/648-borax-comprar.html>
- [23] *Commercial Recovery of Metals From Coal Fly Ash* [online]. [cit. 15.05.2017]. Dostupné z: <http://cornerstonemag.net/commercial-recovery-of-metals-from-coal-fly-ash/>
- [24] AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION. Fly Ash Facts for Highway Engineers. *Federal Highway Administration*. 2003, 76.
- [25] LAHTINEN, Pentti. Fly Ash Mixtures as Flexible Structural Materials for Low-Volume Roads. *Finnish road administration*. 2001, 102, ISSN 1457-9871.
- [26] GOLDEN, Dean M. Fly Ash For Highway Construction and Site Development. Electric Power Research Institute. 2003, 20.
- [27] SAHU, B. K. Improvement in California Bearing Ratio of Various Soils in Botswana by Fly Ash. *International Ash Utilization Symposium*. 2001, 7.
- [28] Guidelines for stabilization of soils containing sulfates. *Texas department of transportation*. 2001, 16.
- [29] Guidelines for Treatment of Sulfate-Rich Soils and Bases in Pavement Structures. *Texas department of transportation*. 2005, 30.

- [30] *Stanovení zrnitosti kameniva – síťový rozbor* [online]. [cit. 15.05.2017].
Dostupné z: http://dk.spsopava.cz:8080/docs/pdf/stavebni_laborator/cviceni/08_stanoveni_zrnitosti_kameniva_sitovy_rozbor.pdf
- [31] DLOUHÝ, Petr, 2013. *Navrhování asfaltových směsí a zkoušení odolnosti proti tvorbě trvalých deformací*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Vedoucí práce doc. Dr. Ing. Michal VARAUS.
- [32] JUCHELKOVÁ, Lenka, 2012. *Namrzavost zemin a materiálů v aktivní zóně násypů pozemních komunikací*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Dušan STEHLÍK, Ph.D.
- [33] *Trojúhelníkový diagram – obecný* [online]. [cit. 15.05.2017].
Dostupné z: http://departments.fsv.cvut.cz/k135/data/wp-upload/2008/03/02-1_troj_graf.JPG
- [34] ČSN 73 6133. *Navrhování a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [35] STEHLÍK, Dušan; ŠPERKA, Pavel a PUDA, Adam. *Pozemní komunikace II: Zkoušení zemin a materiálů v podloží pozemní komunikace*. Brno, 2016.
- [36] KRAJČOVIČ, Tomáš, 2013. *Dynamický kuželový penetrometr pro kontrolu zhutnění podloží vozovek*. Brno. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Dušan STEHLÍK, Ph.D.
- [37] MOHYLA, Marek. *Kalifornský poměr únosnosti* [online]. [cit. 15.05.2017].
Dostupné z: <http://www.geotechnici.cz/wp-content/uploads/2012/08/kalifornsky-pomer-unosnosti.pdf>

6.2 Seznam tabulek

Tabulka 1:	Orientační hodnoty změn vlastností zeminy vztažené na 1 % příměsi pojiva [1]	18
Tabulka 2:	Výpočet vlhkosti hrubozrnné zeminy	37
Tabulka 3:	Stanovení zrnitosti hrubozrnné zeminy.....	37
Tabulka 4:	Výpočet vlhkosti jemnozrnné zeminy	38
Tabulka 5:	Stanovení zrnitosti jemnozrnné zeminy	39
Tabulka 6:	Výpočet vlhkosti směsi zemin.....	40
Tabulka 7:	Stanovení zrnitosti směsi zemin	40
Tabulka 8:	Složky hrubozrnné zeminy	41
Tabulka 9:	Složky jemnozrnné zeminy	41
Tabulka 10:	Složky směsi zemin	42
Tabulka 11:	Optimální vlhkosti	47
Tabulka 12:	Hodnoty standardních sil pro normové kamenivo.....	48
Tabulka 13:	Vzorky připravené ke zkoušení IBI/CBR	49
Tabulka 14:	Výsledné IBI u hrubozrnné zeminy bez pojiva	52
Tabulka 15:	Výsledné CBR u hrubozrnné zeminy bez pojiva	53
Tabulka 16:	Výsledné IBI u jemnozrnné zeminy bez pojiva	54
Tabulka 17:	Výsledné CBR u jemnozrnné zeminy bez pojiva.....	54
Tabulka 18:	Výsledné IBI u směsi zemin bez pojiva	55
Tabulka 19:	Výsledné CBR u směsi zemin bez pojiva.....	56
Tabulka 20:	Výsledné IBI u hrubozrnné zeminy s 2 % cementu	56
Tabulka 21:	Výsledné CBR u hrubozrnné zeminy s 2 % cementu	57
Tabulka 22:	Výsledné IBI u jemnozrnné zeminy s 2 % vápna	58
Tabulka 23:	Výsledné CBR u jemnozrnné zeminy s 2 % vápna	59
Tabulka 24:	Celkové vyhodnocení IBI a CBR všech zkoušených vzorků.....	61

6.3 Seznam obrázků

Obrázek 1:	Vzdušné vápno [22]	15
Obrázek 2:	Okamžitý efekt vápna [8].....	16
Obrázek 3:	Cement [9]	17
Obrázek 4:	Geomříž při pohledu z blízka [15]	24
Obrázek 5:	Pokládka geomříže na separační geotextilii [17].....	25
Obrázek 6:	Štěrka z pěnového skla [18]	26
Obrázek 7:	Umístění štěrku z pěnového skla v permafrostu [19]	27
Obrázek 8:	Technologie použití infracretu [21]	27
Obrázek 9:	Popílek [23]	28
Obrázek 10:	Mapa USA s vyznačenými místy ukázkových projektů [26]	31
Obrázek 11:	Ukázka zdvihu zeminy s vysokým obsahem sulfátů po stabilizaci vápнем [29]	32
Obrázek 12:	Hrubozrnná zemina	34
Obrázek 13:	Jemnozrnná zemina	34
Obrázek 14:	Promývání jemnozrnné zeminy	35
Obrázek 15:	Prosévací zařízení se sadou sít.....	36
Obrázek 16:	Zůstatky hrubozrnné zeminy na sítích 16; 8; 5,6; 2; 0,5; 0,125.....	37
Obrázek 17:	Hutnění zeminy Proctorovou metodou.....	44
Obrázek 18:	Zhutněná jemnozrnná zemina.....	44
Obrázek 19:	Odběr vzorků pro zjištění vlhkosti	44
Obrázek 20:	Proctorova forma s nástavcem a zhutněnou hrubozrnnou zeminou ...	50
Obrázek 21:	Zhutněná jemnozrnná zemina v Proctorově formě připravená na zkoušku IBI.....	50
Obrázek 22:	Lis pro měření IBI a CBR.....	51
Obrázek 23:	Zkouška CBR u hrubozrnné zeminy zlepšené 2 % cementu	51
Obrázek 24:	Výsledek zkoušky CBR u hrubozrnné zeminy zlepšené 2 % cementu ...	51
Obrázek 25:	Zkouška reaktivity vápna	59

6.4 Seznam grafů

Graf 1:	Křivka zrnitosti hrubozrnné zeminy	38
Graf 2:	Křivka zrnitosti jemnozrnné zeminy	39
Graf 3:	Křivka zrnitosti směsi zemin	41
Graf 4:	Trojúhelníkový diagram zrnitosti se zatříděním zemin [36]	42
Graf 5:	Proctor modifikovaný – hrubozrnná zemina.....	46
Graf 6:	Proctor modifikovaný – jemnozrnná zemina	46
Graf 7:	Proctor modifikovaný – směs zemin	47
Graf 8:	IBI – křivka síly/penetrace – hrubozrnná zemina bez pojiva	52
Graf 9:	CBR – křivka síly/penetrace – hrubozrnná zemina bez pojiva	53
Graf 10:	IBI – křivka síly/penetrace – jemnozrnná zemina bez pojiva.....	53
Graf 11:	CBR – křivka síly/penetrace – jemnozrnná zemina bez pojiva	54
Graf 12:	IBI – křivka síly/penetrace – směs zemin bez pojiva.....	55
Graf 13:	CBR – křivka síly/penetrace – směs zemin bez pojiva	55
Graf 14:	IBI – křivka síly/penetrace – hrubozrnná zemina s 2 % cementu	56
Graf 15:	CBR – křivka síly/penetrace – hrubozrnná zemina s 2 % cementu.....	57
Graf 16:	IBI – křivka síly/penetrace – jemnozrnná zemina s 2 % vápna	58
Graf 17:	CBR – křivka síly/penetrace – jemnozrnná zemina s 2 % vápna.....	58